

**MEDICION DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA Y CURVAS DE
RETENCION DE HUMEDAD EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS
UTILIZANDO METODOLOGIAS MODERNAS**



PRESENTADO POR:

LAURA MANUELA ÁNGEL ACOSTA CÓDIGO 505735

DANIEL GERARDO PINEDA AVELLANEDA CODIGO 505897

DOCENTE ASESOR

DOCTOR JUAN CARLOS RUGE

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

BOGOTÁ D.C. 2019

**MEDICION DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA Y CURVAS DE
RETENCION DE HUMEDAD EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS
UTILIZANDO METODOLOGIAS MODERNAS**

ELABORADO POR:

**LAURA MANUELA ANGEL: 505735
DANIEL GERARDO PINEDA: 505897**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

DIRECTOR:

**JUAN CARLOS RUGE CÁRDENAS
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2019**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

DEDICATORIA

A nuestros padres por su esfuerzo y dedicación, por sus sabios consejos, con los cuales día a día nos guiamos para llegar hasta este punto, por creer en nosotros y por brindarnos su amor incondicional siempre. Este logro es por ellos y para ellos.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios, por permitirme llegar a este punto de mi vida, por la satisfactoria culminación de mis logros académicos, a mis padres porque creyeron en mí y porque me sacaron adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega, porque en gran parte gracias a ustedes, hoy puedo ver alcanzada mi meta, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera. Va por ustedes, por lo que valen, porque admiro su fortaleza y por lo que han hecho de mí. Sin ellos nada de esto sería posible, a mi familia que siempre me ha apoyado y han sido incondicional y finalmente al Ingeniero Juan Carlos Ruge por brindarme su conocimiento y guiarme en este proceso.

LAURA MANUELA ANGEL ACOSTA

A mis madre y mi hermana, porque creyeron en mí y porque me sacaron adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega, porque en gran parte gracias a ustedes, hoy puedo ver alcanzada mi meta, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera, y porque el orgullo que sienten por mí fue lo que me hizo ir hasta el final. Va por ustedes, por lo que valen, porque admiro su fortaleza y por lo que han hecho de mí.

DANIEL GERARDO PINEDA

Nota de Aceptación

El trabajo de grado titulado “**Medición de la**

conductividad hidraulica y curvas de retencion de humedad en suelos parcialmente saturados utilizando metodologías modernas". Presentado por los estudiantes Laura Manuela Angel y Daniel Gerardo Pineda. Cumpliendo el requisito para optar al título de pregrado "Ingeniería Civil" fue aprobada por el director Juan Carlos Ruge Cárdenas.

Firma del Presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. 19 de Mayo de 2019

TABLA DE CONTENIDO

TITULO	12
MEDICION DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA Y CURVAS DE RETENCION DE HUMEDAD EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS UTILIZANDO METODOLOGIAS MODERNAS.	12
ALTERNATIVA	12
1 INTRODUCCION	13
2 GENERALIDADES	14
3 ANTECEDENTES	14
4 JUSTIFICACIÓN	17
5 ESTADO DEL ARTE	18
5.1 Medición de las curvas de retención de humedad en laboratorio y su estimación	18
5.2 Caracterización de suelos en ensayos con el sistema Hyprop y WP4Cgarcia	19
6 PLANTEAMIENTO Y FORMULACION DEL PROBLEMA.....	23
7 MARCO REFERENCIAL	24
7.1 MARCO TEORICO	24
7.1.1 Conductividad hidráulica	27
7.1.2 Humedad en el suelo	31
7.1.3 Humedad Gravimétrica	32
7.1.4 Humedad Volumétrica.....	32
7.1.5 Densidad aparente	32
7.1.6 Capacidad de campo	33
7.1.7 Curva de retención de humedad del suelo	33
7.2 MARCO CONCEPTUAL	34
7.2.1 Tensión superficial	34
7.2.2 Succión en suelos	35
7.2.3 Curvas de humedad	36
7.2.4 Capilaridad del suelo.....	37
7.2.5 Humedad en los suelos.....	37
7.2.6 Saturación	38
7.2.7 Agua Desionizada	38
7.2.8 Hyprop.....	38

7.2.9	Diatomeas	39
8	OBJETIVOS	40
8.1	OBJETIVO GENERAL	40
8.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	40
9	ALCANCES Y LIMITACIONES	41
9.1	ALCANCES	41
9.2	LIMITACIONES	41
10	METODOLOGIA	42
10.1	ALISTAMIENTO DE MUESTRA.....	42
10.2	SATURACION PREVIA.....	43
10.3	DESGASIFICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS.....	43
10.4	EJES DE TENSIÓN.....	44
10.5	DESGASIFICACIÓN DE LOS EJES	45
10.6	DESGASIFICACIÓN DE UNIDAD DE CENSADO Y COLOCACIÓN DE LLENADOR DE FIJACIÓN	45
10.7	AJUSTE Y CONECTIVIDAD DE LA BALANZA.....	46
10.8	HYPROP VIEW	46
10.9	MONTAJE DE MUESTRA DE CAOLÍN-DIATOMEAS	46
11	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	48
12	PRODUCTOS A ENTREGAR.....	48
13	EQUIPOS.....	49
14	PRESUPUESTO DEL TRABAJO.....	51
15	ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN Y DIVULGACION.....	51
16	RESULTADOS.....	52
16.1	MUESTRA 100% CAOLIN.....	52
16.1.1	GRAFICA DE INTERPOLACIÓN DE PUNTOS EN DATOS DE LA MUESTRA	53
16.2	CURVA DE RETENCION EN MUESTRA CAOILIN 100%	57
16.2.1	GRAFICA DE RETENCIÓN DEL MARGA COMPUESTO DE CALCITA Y ARCILLA.....	58
16.3	CURVA DE CONDUCTIVIDAD EN MUESTRA CAOLIN 100%	59
16.4	MUESTRA 90% CAOLIN Y 10% DIATOMEAS.....	61
16.4.1	FASE 1:.....	62
16.4.2	FASE 2:.....	63

16.4.3	FASES 3 Y 4.....	64
16.5	CURVA DE CONDUCTIVIDAD EN MUESTRA DE 100% CAOLIN ..	66
16.6	MUESTRA 80% CAOLIN Y 20 % DIATOMEAS	67
16.6.1	FASE 1:.....	68
16.6.2	FASE 2:.....	69
16.6.3	FASE 3 Y 4:	69
16.7	CURVA DE RETENCION MUESTRA 80% CAOLIN Y 20% DIATOMEAS	70
16.8	CURVA DE CONDUCTIVIDAD EN MUESTRA 80% CAOLIN Y 20% DIATOMEAS	70
16.8.1	GRAFICA DE PERDIDA DE PESO	71
16.9	MUESTRA 70% CAOLIN 30% DIATOMEAS	72
16.9.1	FASE1:.....	73
16.9.2	FASE 2:.....	73
16.9.3	FASE 3:.....	74
16.9.4	FASE 4:.....	75
16.10	CURVA DE RETENCION MUESTRA 70% CAOLIN Y 30% DIATOMEAS	75
16.11	CURVA DE CONDUCTIVIDAD EN MUESTRA 100% CAOLIN	76
17	ANALISIS DE LOS RESULTADOS.....	78
17.1	MUESTRA 1	78
17.2	ANALISIS DE CURVAS DE RETENCION EN MUESTRAS.....	81
17.3	ANALISIS DE CURVA DE CONDUCTIVIDAD EN MUESTRAS	82
18	CONCLUSIONES	84
19	RECOMENDACIONES	85
19.1	RECOMENDACIONES PARA LA TOMA DE MUESTRAS	85
18	BIBLIOGRAFIA	86
20	ANEXOS	89

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Metodos para determinar la curva de retencion la conductividad hidraulica	28
Tabla 2 Fases del suelo	31
Tabla 3 Cronograma de actividades	48
Tabla 4 Productos a entregar.....	49
Tabla 5 Presupuesto	51
Tabla 6 Tabla de resultados	80
Tabla 7 Tabla de resultados Retención	81
Tabla 8 Tabla resultados Conductividad	83

INDICE FIGURAS

FIGURA 1Determinación de las funciones de suelos no saturados	16
FIGURA 2 Evolución temporal del potencial hídrico	21
FIGURA 3 Curva pronosticada, Curva generada con el sistema Hyprop	22
FIGURA 4 Curva de compactación con respecto a la retención hidráulica.....	26
FIGURA 5 Muestra 100% Caolín	52
FIGURA 6 Grafica de tiempo vs tensión de la muestra 100% caolín.....	53
FIGURA 7 Grafica optima de resultados.....	54
FIGURA 8 Fase 1 de la gráfica 100% caolín	55
FIGURA 9 Fase 2 de la gráfica 100% caolín	56
FIGURA 10 Fase 3 de la gráfica 100% caolín	57
FIGURA 11 Curva de Retención en muestra 100% Caolín	58
FIGURA 12 Grafica de retención del marga	58
FIGURA 13 Curva de conductividad en muestra 100% caolin.....	60
FIGURA 14 curva de contenido de agua volumétrico versus presiones negativas	60
FIGURA 15 Muestra 90% caolín y 10% diatomeas	61
FIGURA 16 Grafica de tiempo vs tensión de la Muestra 90% caolín y 10% diatomeas	62
FIGURA 17 Fase 1 Muestra 90% caolín y 10% diatomeas	63
FIGURA 18 Fase 2 Muestra 90% caolín y 10% diatomeas	63
FIGURA 19 Fase 3 y 4 Muestra 90% caolín y 10% diatomeas.....	64
FIGURA 20 Curva de retención para la Muestra 90% caolín y 10% diatomeas	65
FIGURA 21 Curva de conductividad en muestra de 100% caolín.....	66
FIGURA 22 Curva de contenido de agua volumétrico versus presiones negativas en pF	67
FIGURA 23 Muestra 80% caolín y 20% diatomeas	67
FIGURA 24 Grafica de tiempo versus tensión Muestra 80% caolín y 20% diatomeas	68
FIGURA 25 Fase 1 Muestra 80% caolín y 20% diatomeas	69
FIGURA 26 Curva de retención Muestra 80% caolín y 20% diatomeas	70
FIGURA 27 Curva de conductividad Muestra 80% caolín y 20% diatomeas	71

FIGURA 28 Grafica de tiempo versus peso Muestra 80% caolin y 20% diatomeas	71
FIGURA 29 Muestra 70% caolín 30% diatomeas	72
FIGURA 30 Grafica tiempo versus tensión Muestra 70% caolín 30% diatomeas	72
FIGURA 31 Fase 1 Muestra 70% caolín 30% diatomeas	73
FIGURA 32 Fase 2 Muestra 70% caolín 30% diatomeas	74
FIGURA 33 Fase 3 Muestra 70% caolín 30% diatomeas	74
FIGURA 34 Fase 4 Muestra 70% caolín 30% diatomeas	75
FIGURA 35 Curva de retención Muestra 70% caolín 30% diatomeas	76
FIGURA 36 Curva de conductividad Muestra 70% caolín 30% diatomeas	77
FIGURA 37 Grafica tiempo versus peso Muestra 70% caolín 30% diatomeas	77

INDICE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Partes del Hyprop	19
---------------------------------------	----

TITULO

MEDICION DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA Y CURVAS DE RETENCION DE HUMEDAD EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS UTILIZANDO METODOLOGIAS MODERNAS.

ALTERNATIVA

Teniendo en cuenta el acuerdo 171 de la Universidad Católica de Colombia, donde se establece las alternativas de trabajo de grado en los programas de pregrado en el área de ingeniería; se ha optado por la alternativa de trabajo de investigación, el equipo que se va a trabajar es el Hyprop, este equipo determina curvas de retención y conductividad hidráulica en suelos saturados.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

El trabajo de grado está enmarcado dentro de la línea de investigación aprobada por la Universidad Católica de Colombia, denominada Mecánica de Suelos, el Hyprop es un sistema de medición, que está destinado a ser utilizado para la medición de retención de agua y la conductividad hidráulica, como una función de la tensión de agua y el contenido de la misma en muestras de suelo.

EJE TEMÁTICO:

El eje central dentro del cual se va a desarrollar el trabajo de grado corresponderá a desarrollar en el equipo Hyprop las propiedades hidráulicas de muestras de suelo, con tensiómetros en dos profundidades, el dispositivo mide la tensión del agua del suelo, así como la conductividad hidráulica no saturada.

1 INTRODUCCION

Los suelos en el campo de la ingeniería son de gran importancia, ya que saber las condiciones de esfuerzo y conductividad al momento de desarrollar una construcción, son indispensables para saber el comportamiento de las partículas de suelo sometidas a esfuerzos.

Los factores principales que se tienen en cuenta en las curvas de retención de agua son la presión, humedad gravimétrica, cambio de peso, temperatura y la tensión en el suelo, los cuales nos indica procedimientos extensos y dispendiosos en tiempo, estos métodos de medición no expresan con gran exactitud el comportamiento de los suelos. Las muestras inalteradas tienden hacer muy variables aunque se tomen del mismo lote de prueba, se explica esto por la variación de las características en los suelos. Un suelo saturado se comporta de diferentes formas según la cantidad de vacíos que hay entre moléculas.¹

Cada tipo de suelo se comporta de diferente manera según su composición geológica, aunque se extraiga varias muestras en un mismo lugar no se logran los mismos resultados. Para la determinación de curvas de humedad y conductividad hídrica, se estudiarán cuatro diferentes tipos de muestras de suelo, las cuales son muestras alteradas y con diferentes porcentajes de diatomeas, después de realizar el ensayo de laboratorio, se generaran curvas de retención (contenido volumen de agua vs pF (-)), curvas de conductividad ($\log_{10} (K \text{ in cm/d})$ vs Pf (-)), para cada muestra se determina una curva de conductividad y retención, las cuales relacionan la humedad y la tensión de agua en el suelo.²

Para hacer estas mediciones, se utilizará el equipo Hyprop, el cual determina en menor tiempo y mayor exactitud estas variables. Usualmente las muestras de suelo alteradas que se estudian con métodos convencionales pueden generar meses de estudio, el mecanismo que maneja el hyprop simplifica los tiempos de medición y las cantidades de extracción de muestra, permitiendo puntos más exactos en concentraciones de suelos más pequeñas. Se comparará el resultado obtenido con registros obtenidos por medio del mismo método de la roca marga, ya que sus componentes son similares al de las arcillas estando compuesto de calcita y arcillas.

¹ SANCHEZ DIAZ, Laura Karina. Análisis del comportamiento de la curva característica de humedad en geo-materiales intermedios sometidos a diferentes niveles de estrés térmico. Bogotá. 2015.

² MARTINEZ FERNANDEZ, J. Medida de Curvas de retención de humedad en laboratorio y su estimación. Departamento de geografía. Universidad de Salamanca.

2 GENERALIDADES

3 ANTECEDENTES

Para determinar las propiedades hidráulicas del suelo, las curvas de retención de humedad ayudan a desarrollar su conocimiento en cuanto a conductividad hidráulica, drenaje, infiltración, movimiento de sólidos, ya que proporciona información crítica sobre el comportamiento de los suelos saturados, parcialmente saturados y no saturados, es muy importante conocer el comportamiento de los suelos ya que según sus características se pueden definir muchas de las propiedades que los caracterizan.³

El estudio del comportamiento de los suelos expansivos, requiere tener en cuenta la variabilidad en el estado de esfuerzos del suelo, puesto que el potencial expansivo del suelo no se desarrolla si el suelo se encuentra saturado, sino cuando se dan cambios en el contenido de humedad, y el suelo se encuentra en el rango de parcialmente saturado.⁴

A medida que han transcurrido los años se han desarrollado diferentes métodos para poder realizar esta curva, en 1964, Brooks y Corey, propuso el primer método que consiste en la determinación de la pendiente de la curva de retención de humedad en la zona de drenaje, esta se grafica de manera logarítmica, donde la pendiente se utiliza como exponente en la función de conductividad hidráulica.

El Modelo de Campbell, desarrollado en 1974, indica que la medida de la conductividad hidráulica no saturada resulta mucho más difícil de medir con precisiones que la saturada, no existiendo un método cuya validez sea general para todos los suelos y circunstancias.

Por ello Van Genuchten, en 1980, desarrolló una ecuación empírica para la curva característica, la cual es una función continua, que hasta el momento es un modelo que se sigue utilizando para determinar la conductividad hidráulica.

En 1950, Childs y Collis-George desarrollaron un método para determinar la conductividad hidráulica por medio de la distribución del tamaño de los poros.

Demostrando que la distribución de estos tamaños es uno de los factores más importantes a la hora de hallar la curva de retención, ya que este método relaciona la distribución del tamaño de los poros y la distribución del tamaño de las partículas.⁵

³ MEZA OCHOA, Victoria Elena. Suelos Parcialmente Saturados, de la investigación a la Cátedra Universitaria. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia:2012

⁴ YANG Wen-Hsi. Mapping soil water retention curves via spatial Bayesian hierarchical models, Australia, 2006

⁵ MEZA OCHOA, Victoria Elena. 2012.

En el año de 1978, se define el criterio de los tamaños de los poros, esto conllevó a ser la base para generar un modelo probabilístico de conductividad hidráulica de suelos, el cual era afectado por un parámetro de regresión y un factor de forma.⁶ Estos dos métodos son empíricos, por tal motivo Juang y Holtz, en 1986 plantearon un nuevo modelo fundamentado en una nueva función de densidad de tamaño de poro y en probabilidades. Este método es útil para la predicción de la conductividad hidráulica en suelos compactados.⁷

A partir de es método, se determina en 1996, Burland y Ridley, que para los suelos que están parcialmente saturados, el agua que se encuentra retenida en los poros, se controla por la presión de poros, este método se sustenta por medio de la teoría de la capilaridad, que indica que la succión del agua en un suelo es proporcional a la tensión superficial e inversamente proporcional al radio de poro; sucede que cuando los suelos están parcialmente saturados, la adherencia de las partículas del suelo y el agua, forman meniscos que establecen la presencia de succión de agua en el suelo.⁸

En el año 2000, Zapata, desarrollaron un modelo para determinar las curvas características a partir de propiedades tales como el índice plástico y el porcentaje de material que pasa la malla No. 200 para los suelos finos y el diámetro correspondiente al 60% de material de la curva de distribución granulométrica (D60) para los suelos granulares.⁹

En 2002, según Fredlund, Houston y Houston, la determinación de las funciones de suelos no saturados se puede dividir en cuatro niveles.¹⁰

⁶ DONADO GARZON, Leonardo David, COLMENARES MONTAÑEZ, Julio Esteban, Modelo de Conductividad Hidráulica en suelos, Tesis de Magister en Ingeniera, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá DC. May0 2014.

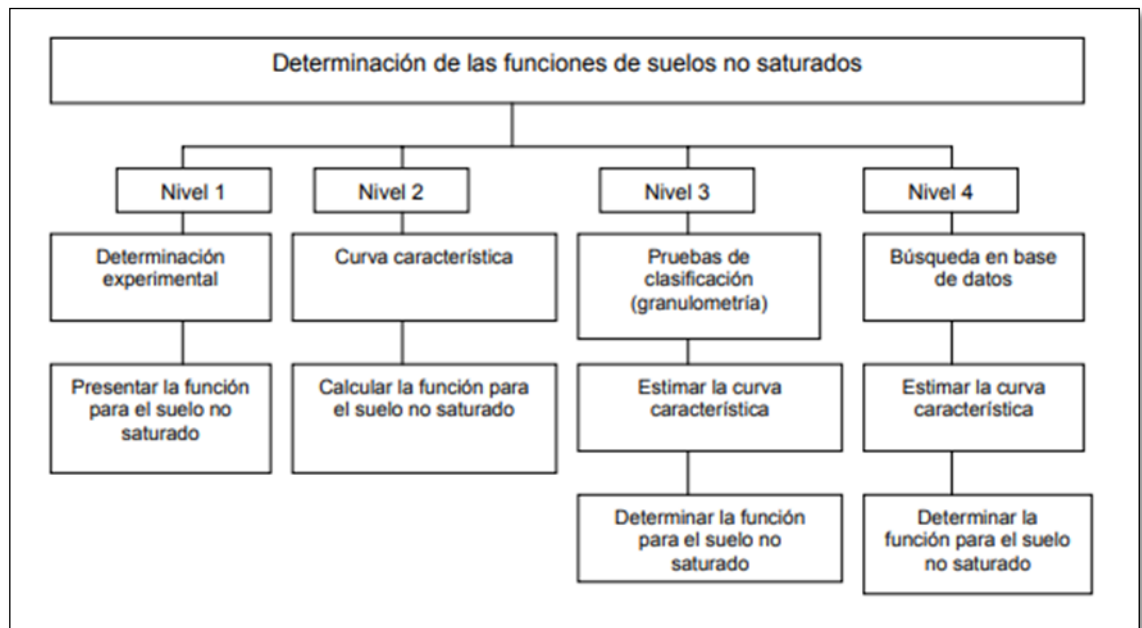
⁷ CHIAPONNI L. Water retention curves of multicomponent mixtures of spherical particles, Italy, 2017

⁸ KANG M, CHENG C.L, BILHEUX H.Z, LEE J., HORITA J., WARREN J.M, Multiple pixel-scale soil water retention curves quantified by neutron radiography, United States, 2014.

⁹ PEREZ GARCIA Natalia, GARNICA ANGUAS Paul, POLA VELAZQUEZ Julio Cosme. Predicción de la curva característica con el modelo de proporcionalidad natural. Instituto Mexicano de Transporte. México, 2008.

¹⁰ PEREZ GARCIA Natalia, GARNICA ANGUAS Paul, POLA VELAZQUEZ Julio Cosme.

FIGURA 1 Determinación de las funciones de suelos no saturados ¹¹



Fuente: PEREZ GARCIA Natalia, Determinación de curvas, características en suelos no saturados con celdas de presión, SANFANDILA, 2008

El primer nivel involucra costos altos y consecuencias serias en caso de fallas, es necesario desarrollar las pruebas de laboratorio necesarias para determinar las funciones. Para esta determinación se pueden utilizar equipos tales como triaxial, corte directo, celdas de membrana, etc. Hay que determinar propiedades como granulometría, determinación de propiedades en muestras saturadas, gravedad específica, características de compactación.

En el nivel dos se determina que curva característica se va a utilizar para calcular las funciones en los suelos no saturados, determinando así propiedades índice y propiedades de los suelos saturados, que se utilizarán para determinar las funciones.

En el nivel tres con base a los resultados de la propiedad índice, con base a la curva característica se estiman el comportamiento de las funciones.

En el cuatro nivel, con base en las propiedades índice y las bases de datos, se establece una correlación donde se tengan en cuenta parámetros geotécnicos para el desarrollo de los cálculos.

¹¹ PEREZ GARCIA Natalia, Determinación de curvas, características en suelos no saturados con celdas de presión, SANFANDILA, 2008

4 JUSTIFICACIÓN

La Curva de Retención de Humedad de un suelo muestra la evolución que tiene el contenido de agua con respecto a la succión del suelo, su morfología depende de la textura, estructura y contenido en materia orgánica presente en el suelo. Esta curva de retención de humedad tiene en cuenta la cantidad de poros que están llenos de agua, por lo cual ^{.12}

El HYPROP (Hydraulic Propierty Analyzer), determina el contenido hídrico (volumétrico) en una muestra vs el potencial de agua que contiene la misma, partiendo de una muestra de suelo alterada recogida en un cilindro de 250 cm³, las variables se miden con dos tensiómetros que están colocados a dos profundidades diferentes, hay que tener en cuenta que el hyprop también mide la temperatura con un micro sensor termino instalado en la base del equipo, después de generar esta información, por medio del software HYPROP FIT. Después de se conecta a una balanza la registra las pérdidas de agua por evaporación. El proceso tarde de 3 a 5 días en arrojar las gráficas de conductividad y retención. El Hyprop nace de la necesidad de obtener curvas completas en periodos de tiempo cortos, registrar la pérdida de peso, registro del potencial hídrico y temperatura de la muestra con datos que sean confiables.

Especificado esto, el hyprop permite determinar estas características del suelo, optimizando el tiempo y los costos, ya que anteriormente un proceso para la determinación de esta curva tardaba aproximadamente más de tres semanas, es por esto se genera la necesidad de realizar el procedimiento en un equipo que ayude a mejorar la calidad de los resultados que se obtienen y las herramientas básicas de los estudios necesarios que se deben desarrollar para lograr controlar simultáneamente los cambios en el peso de las muestras de suelo, así como el potencial de la matriz del suelo a dos profundidades a lo largo de un proceso de secado gobernado por evaporación desde la superficie del suelo.

El desarrollo se llevará a cabo con una metodología experimental que proporcione Curvas de Retención de Humedad y de Conductividad Hidráulica de elevada precisión. Se determinarán las curvas de retención de 4 muestras de suelo (todas arcillas con diferentes porcentajes de diatomeas), determinando así las características de cada suelo para determinar la succión contra el grado de saturación y se compararan los resultados con las curvas de retención y conductividad del marga debido a que sus componentes son similares a los de las arcillas.

¹² METER GROUP, EUROABC Blog de lisímetro, curva de retención de humedad de una arcilla, 2014.

5 ESTADO DEL ARTE

5.1 Medición de las curvas de retención de humedad en laboratorio y su estimación

Las curvas de tensión de humedad se utilizan especialmente para determinar el índice de humedad disponible en el suelo, en otras palabras, la porción de agua que puede ser absorbida para detectar por ejemplo cambios en la estructura del suelo y determinar la relación entre la tensión de la humedad del suelo y otras propiedades físicas.

En su determinación se emplean tanto métodos directos como indirectos. El principal inconveniente de los métodos directos está asociado a los costos en materia, esfuerzo y recursos que requieren. Es por esto que los métodos indirectos surgen como una opción para dar solución a esos inconvenientes.

Para la determinación de las curvas de humedad se toman diferentes muestras de suelo en profundidades distintas, en las que se analizan puntos de variación de humedad respecto a la pérdida de peso del mismo, su principal medio de estudio es la capacidad de un suelo o material poroso en retener agua en función de la succión.¹³

La medición de la curva de retención de agua en el campo, tiene como principal ventaja el estudio del proceso en condiciones naturales. Sin embargo, las dificultades técnicas y teóricas, así como la gran cantidad de tiempo necesaria para su realización, hacen que no siempre sea viable.

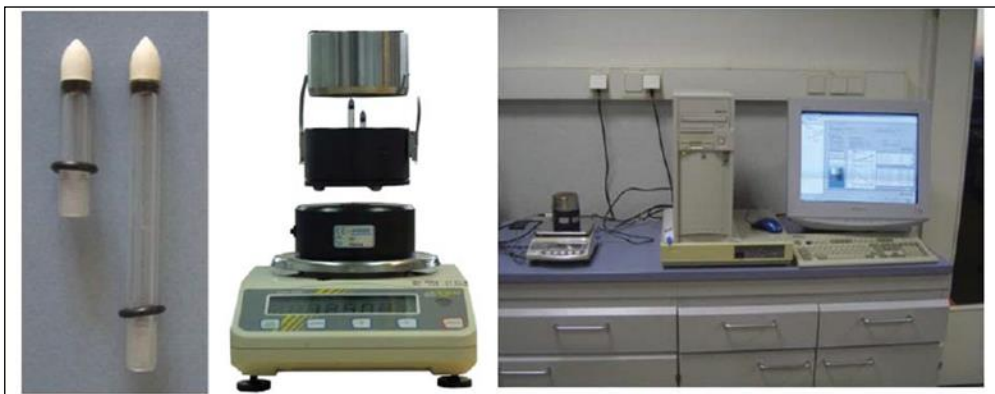
Para la medición de la relación en laboratorio se utiliza el método del recipiente de tensión hídrica, en conjunto con la membrana a presión ya que permite tener una cantidad de datos necesarios para generar una curva de retención hidráulica, al permitir en simultaneidad medir en diferentes muestras los valores de la curva de retención de humedad.

¹³ MARTINEZ FERNANDEZ, J. Medida de Curvas de retención de humedad en laboratorio y su estimación. Departamento de geografía. Universidad de Salamanca.

5.2 Caracterización de suelos en ensayos con el sistema Hyprop y WP4C

A pesar de su importancia la caracterización hidráulica de suelos y sustratos se realiza por métodos indirectos, las funciones de edafo-transferencia (FET). En este estudio se muestra que el conjunto de equipos HYPROP y WP4C son una metodología experimental fiable y que proporciona Curvas de Retención de Humedad (CHR) y de Conductividad Hidráulica (CCH) de elevada precisión. Se caracterizaron hidráulicamente 37 muestras de suelo procedentes de 9 localizaciones diferentes, con las dos metodologías, FET y método experimental.

Ilustración 1 Partes del Hyprop ¹⁴



Fuente: SCHINDLER uwe, VON UNOLD George, MULLER Lothar, Messung bodenhydraulischer kennfunktionen von Boden im ladoe im Zyklus austrocknung und Wiederbefeuchtung

Como observamos en la figura dos, las muestras se recogieron con la ayuda de un anillo de acero inoxidable de 250 cm³ de volumen. En laboratorio las muestras se llevaron a saturación por capilaridad y se analizaron en el sistema Hyprop según indicaciones del fabricante. Para el sistema WP4C (Decagon Devices, Pullman, WA, USA) las muestras se tamizaron y humectaron en distinto grado. WP4C proporcionó medidas puntuales de la suma del potencial mátrico y osmótico. Los datos obtenidos se procesaron con el programa HYPROP Fit (versión 2.0).

Los valores de Capacidad de Campo (θ_{cc}), Punto de Marchitez Permanente (θ_{pmp}), Capacidad Retención de Agua Disponible (CRAD), obtenidos con ambas metodologías se compararon y se comprobó que existen diferencias significativas. En valor absoluto, se han encontrado diferencias entre los valores de θ_{cc} de hasta 21% y en θ_{pmp} de 43%. Las FET no tienen en cuenta la estructura ni la mineralogía del suelo. Los resultados muestran la necesidad

¹⁴ SCHINDLER uwe, VON UNOLD George, MULLER Lothar, Messung bodenhydraulischer kennfunktionen von Boden im ladoe im Zyklus austrocknung und Wiederbefeuchtung

de realizar estudios de sensibilidad / validación en cada caracterización, ya que si los parámetros hidráulicos de la caracterización no son precisos, las posibles decisiones que se puedan tomar o estimar (duración del riego o de la fertirrigación, la recarga subterránea o los balances hídricos) no se ajustarán a los procesos reales y podrán tener consecuencias no deseadas, como la erosión o la contaminación de suelos y acuíferos.¹⁵

5. 3 Método de Evaporación en el laboratorio

El uso de Hyprop como método de evaporación mejorada.

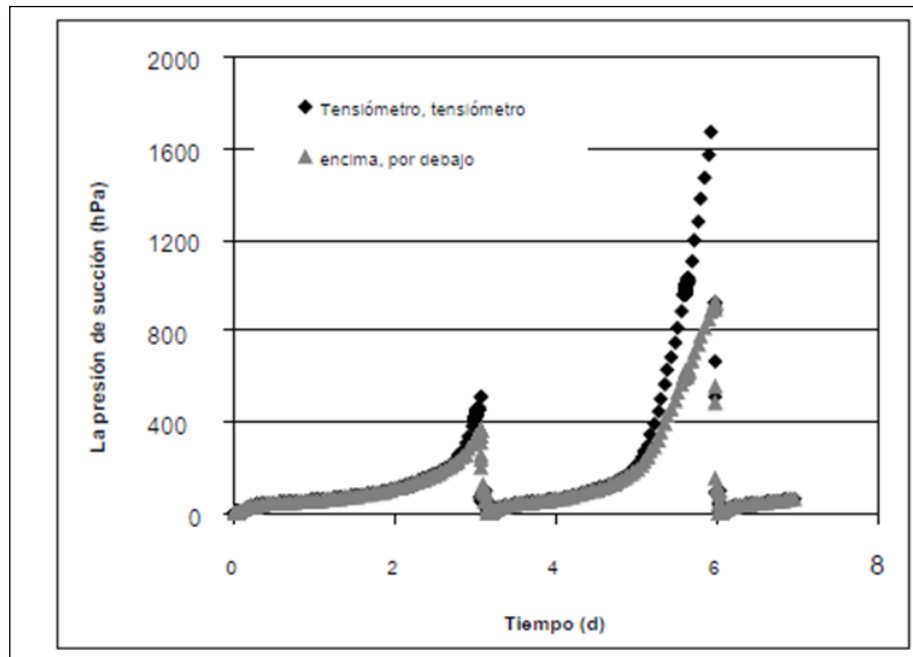
Se realizó un estudio de las curvas de conductividad con el método de evaporación para determinar las curvas de retención del suelo, se tomaron 20 muestras diferentes en donde se midió el cambio de volumen en el suelo según la cantidad de agua.

Estas mediciones permitieron determinar, los valores de capacidad de campo, punto de marchitez permanente, capacidad de retención de agua disponible Y el momento en el que las lecturas de los tensiómetros miden el paso del aire entre las partículas de las muestras, revelando un indicio de no saturación de los suelos y cambios de volumen en las distintas muestras.

Los resultados proporcionados se basaron en el ciclo de secado natural y la re humectación del suelo, demostrando que la presión ejercida por la succión del suelo disminuye mediante tenga más cercanía con la superficie y completa el ciclo cuando los dos tensiómetros no tengan succión en el suelo.

¹⁵ M. Fontanet, G. et al. Caracterización hidráulica se suelos en ensayos de eco fisiología con el sistema HYPROP y WP4C

FIGURA 2 Evolución temporal del potencial hídrico ¹⁶



Fuente: SCHINDLER uwe, VON UNOLD George, MULLER Lothar, Messung bodenhydraulischer kennfunktionen von Boden im ladee im Zyklus austrocknung und Wiederbefeuchtung.

Como conclusiones de este estudio se determinó en todas las muestras que: La conductividad hídrica se puede medir desde los 100 hPa, la presión de succión hasta los 500 hPa se considera como una succión de drenaje de muestra, en ese momento se tiene una precipitación que da aviso de la terminación de medidas del tensiómetro superior, luego comienza un estado de evaporación llegando hasta la histéresis de la muestra total. Que puede llegar hasta los 2000 hPa entre cuatro a cinco días, de ahí se dice que los tensiómetros han tenido paso de aire entre las puntas de porcelanato. Con esto se determinan las curvas de retención respecto a la humedad y las grafica de conductividad hídrica de un piso de suelo variado.¹⁷

5.4 Software de ajuste de medición de curvas de Humedad Hídrica

SHYPFIT es un programa de computadora diseñada para ajustar las funciones de retención de aguas medidos y para medir la función de conductividad hidráulica relativa relacionada. Para ejecutar el programa se necesita un archivo de datos que contengan la retención de agua medidos como entrada,

¹⁶ SCHINDLER uwe, VON UNOLD George, MULLER Lothar, Messung bodenhydraulischer kennfunktionen von Boden im ladee im Zyklus austrocknung und Wiederbefeuchtung.

¹⁷ SCHINDLER uwe, VON UNOLD George, MULLER Lothar, Messung bodenhydraulischer kennfunktionen von Boden im ladee im Zyklus austrocknung und Wiederbefeuchtung.

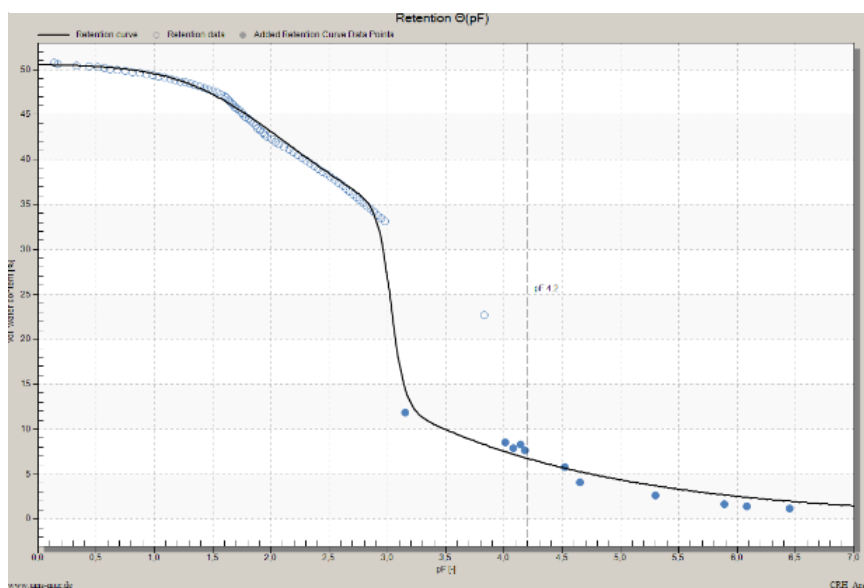
algunos parámetros para la elección del modelo, el control de salida entre otros.

El mecanismo de modelación de curvas y conductibilidad empleado por el Hyprop para la estimación global de las funciones hídricas iniciales, la eliminación de errores cercanos en la saturación, estimación de la retención y conductividad. Las características principales de mejora en ajusten van desde; En la retención desde modelos paramétricos hasta modelos bimodales, eliminación de datos que resultan en las no linealidades del perfil del agua vertical en columnas del suelo.

Las propiedades hidráulicas de los medios porosos se pueden estimar a partir de las distribuciones de tamaño de poro, considerando modelos conceptuales microscópicos para la conectividad de poros y dado que las distribuciones de tamaño se pueden deducir de la curva de retención de agua, como se puede ver en la figura 4 se han desarrollado modelos matemáticos, donde la función de la conductividad hidráulica relativa y la conductividad se calcula, en SHYPFIT se pueden elegir cualquiera de los seis modelos predictivos.¹⁸

19

FIGURA 3 Curva pronosticada, Curva generada con el sistema Hyprop



Fuente: METER GROUP, EUROABC Blog de lisímetro, curva de retención de humedad de una arcilla, 2014.

¹⁸ DURNER w. Shyfit user's manual draft versión 0.24, November 10, 1998

¹⁹ METER GROUP, EUROABC Blog de lisímetro, curva de retención de humedad de una arcilla, 2014.

El SHYPFIT es una herramienta que sirve para medir las funciones hídricas cambiantes en diferentes tipos de suelos, estimando errores de medición en la saturación y sacando ponderaciones en los coeficientes de retención hídrica en el suelo.

Cuando se ajustan las funciones de retención a los datos medidos, dos criterios importantes a tener en cuenta son: la elección correcta del modelo y la estimación precisa de los parámetros del modelo. El mejor método para juzgar la fiabilidad de la optimización. El resultado es ver una gráfica como se evidencia en la figura 5, donde se muestra los datos medidos y la curva de retención ajustada, para ver en la gráfica las desviaciones entre ellos, si la elección del modelo no fue correcta, las desviaciones no deberían estar correlacionadas, es decir estarían dispersos al azar.

6 PLANTEAMIENTO Y FORMULACION DEL PROBLEMA

¿Cómo ayudan las metodologías modernas a optimizar en tiempo y efectividad la determinación de las curvas de retención hídrica y conductividad hidráulica?

La medición del potencial hídrico del suelo para crear una curva de humedad siempre ha sido difícil. Estas medidas requieren una enorme cantidad de trabajo. Además, aún enfrenta limitaciones, como la falta de puntos de datos, que afectan el resultado final. Algunos métodos tardan varios meses en completar una curva parcial. Y si eso no fuera suficiente, nunca ha habido una manera fácil de medir el rango del potencial hídrico del suelo para toda una curva.²⁰

La conductividad hidráulica saturada es una propiedad clave en la descripción de los procesos de infiltración y redistribución de agua en el suelo. Esta puede ser determinada en el laboratorio y en el campo. En el laboratorio la determinación de la conductividad hidráulica se realiza en muestras cilíndricas no disturbadas, mediante el uso de un permeámetro de carga constante o con un permeámetro de carga variable. Debido a las limitaciones para obtener muestras no disturbadas representativas, además del relativo pequeño tamaño de las mismas, así como la variabilidad de las mediciones, es preferible realizar mediciones de campo.²¹

La curva de Retención de Humedad (CRH) como la evolución de la cantidad de agua retenida en un suelo, expresada en unidades de masa o volumen, con el

²⁰ Schmugge, T. J., 1985: Remote sensing of soil moisture. In: Hydrological Forecasting (M. G. Anderson y T. P. Burt, eds.), John Wiley, Nueva York, págs. 101 - 124. 5. Klute, A. (ed.), 1986: Methods of Soil Analysis. Part I: Physical and mineralogical methods. Second edition, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.

²¹ GABRIELS Donald, LOBO Deyanira L. y PULIDO Mansonia M, Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos, Gabriels et al. Venesuelos 14:7-22

su potencial. Característica de cada suelo. Básica para la caracterización del suelo. Su morfología depende de la textura, estructura y materia orgánica.

Este trabajo se desarrolla con caolín (arcilla) ya que es uno de los tipos de suelos con los que más tienen que lidiar los ingenieros civiles a la hora de llevar a cabo una obra, en el estudio geotécnico se definen las propiedades del suelo por lo cual el presente proyecto, se muestra una forma efectiva y veraz de definir estas propiedades.

Se desarrolla el trabajo con diferentes porcentajes de diatomeas ya que estas proporcionan resistencia al corte y a los esfuerzos en el suelo, con base en esto se determinará si dependiendo al porcentaje de diatomeas la succión en el suelo aumenta o disminuye.

Los métodos que se han estudiado para desarrollar las curvas de retención son el método de tensión hídrica, membrana presión, olla a presión, papel filtro, método placa succión, entre otros, los métodos que se implementan para establecer la conductividad hidráulica son: método de la carga constante de agua, método de carga variable de agua, método del pozo, método del piezómetro, entre otras, que al ser métodos tan extensos provocan retrasos y pérdidas de tiempo, lo que se busca con las metodologías modernas es obtener de manera más rápida y exacta la curva de retención.

El HYPROP mide el potencial del agua cambiante, básicamente el peso de la muestra varia pasado el tiempo y se determinan con mayor exactitud los puntos para realizar la curva en menor tiempo, su forma de medición es comparar la pérdida de agua respecto al tiempo en una muestra de suelo a una temperatura estándar.

7 MARCO REFERENCIAL

7.1 MARCO TEORICO

El contenido de humedad que retiene un suelo es proporción al esfuerzo matricial del mismo, cada tipo de suelo tiene unas características diferentes, como lo es el tamaño de sus poros y el tiempo de saturación. Medir curvas de retención nos permite evidenciar los cambios que pueden tener las muestras de suelo respecto al tiempo de secado, se mide según el esfuerzo de succión en los poros en pF.

En general las curvas de retención de humedad se utilizan principalmente para:

- Determinar un índice de humedad disponible en el suelo, es decir, la porción de agua que puede ser absorbida por las plantas.
- Estimar determinados valores de humedad característicos de la relación suelo-agua-planta, como la capacidad de campo o el punto de marchitamiento permanente.

- Clasificar los suelos; detectar cambios en la estructura del suelo.
- Determinar la relación entre la tensión de la humedad del suelo y otras propiedades físicas.

DETERMINANTES

La curva de retención de agua se puede determinar en el campo o en el laboratorio. La experimentación, en el primer caso, requiere la instalación de psicrómetros o tensiómetros, para el control del potencial del agua en el suelo, y de un dispositivo de medida de la humedad en el mismo punto, debiendo tener ambos un volumen de suelo de referencia similar.

Evaluar la distribución de tamaños de partículas en función de la conductividad hidráulica, es un aspecto muy importante para entender los comportamientos de materiales en estado de saturación parcial. La determinación experimental en curvas de retención define la lectura que se expresa a partir de la relación entre succión del agua en un suelo y el contenido de agua en el mismo, es decir, el contenido de agua en el suelo mediante la humedad que se genera de manera natural. La conductividad hidráulica es un parámetro, que varía, en el caso de suelos parcialmente saturados su valor depende de la cantidad de poros que están llenos de agua.

La presión del agua controla la cantidad de agua retenida en los suelos parcialmente saturados, en teoría el valor que se genera resulta siendo de la teoría capilar, que explica como la succión del agua que se encuentra en un suelo es alícuota a la tensión superficial y a su vez en inversamente proporcional al radio del poro. Si se tiene un suelo parcialmente saturado, la cohesión que se genera entre el agua y los granos del suelo, generan meniscos, lo que nos lleva a inferir que hay presencia de succión de agua en ese suelo.²²

La composición y distribución granulométrica de los suelos, permite definir la forma de la curva de retención de agua de muestras seleccionadas por valores que corresponden al tipo de suelo, con una determinada densidad.

La geometría de los poros, la magnitud y composición mineralógica son determinantes en la posición relativa, forma e inclinación de la curva de humedad²³, para el caso de suelos finos estos se saturan en forma gradual debido a que en las arcillas la saturación tiene mayor pronunciación con respecto a otros materiales, debido a que entre más granular sea el suelo, esta propenso a perder agua de manera más rápida.

²² MEZA OCHOA Victoria Elena, Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. 2012.

²³ BEJARANO Jean, CORRALES Valeria, Daniela Realpe. Determinación de curvas de retención de agua para suelos no saturados y su relación con la estabilidad de taludes, 2015.

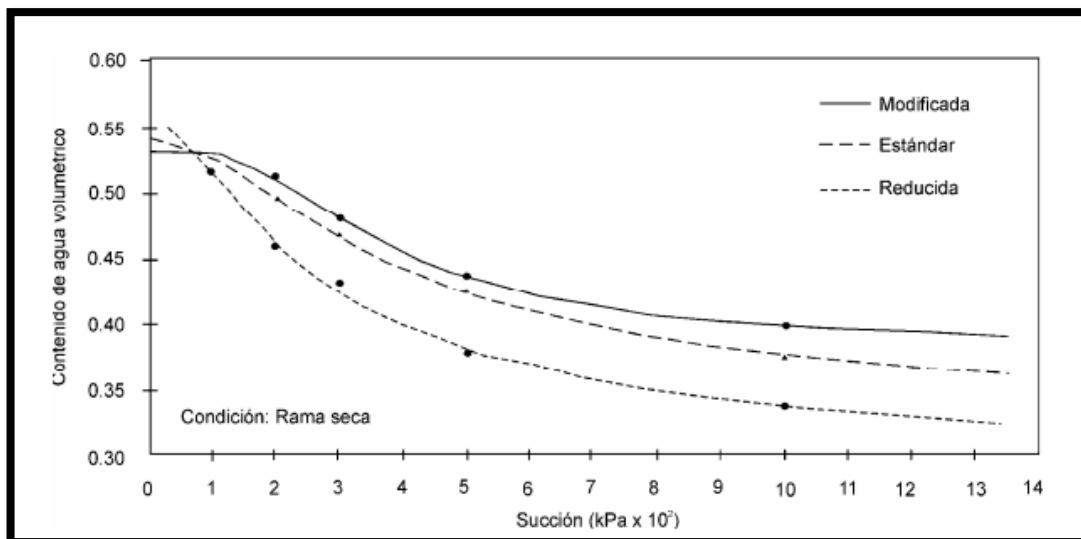
Normalmente existen dos clasificaciones en el estudio de mecánica de suelos “parcialmente saturados o suelos “No saturados” y están constituidos en dos fases: partículas sólidas-agua y partículas- solidas-aire, respectivamente, pero en el caso intermedio, cuando el suelo está parcialmente saturado, se involucran tres fases en el suelo que interactúan entre sí, partículas sólidas, agua y aire o aire, agua o membrana contráctil.

Se considera un suelo saturado cuando los espacios vacíos están ocupados completamente por agua, por otro lado, también pueden estar en estado seco, que es la que se encuentra más cerca de la superficie del terreno y en este caso la mayor parte de los vacíos se encuentran llenos de aire. La franja más cercana al nivel freático es la franja capilar, allí la mayor parte de los vacíos se encuentran llenos de agua de manera continua, aunque se pueden presentar en ocasiones una fase discontinua gaseosa al presentar burbujas de aire.

Estas son variables que tienen que tenerse en cuenta al evaluar la medición de las curvas de humedad, junto con otros aspectos que afectan la medición como lo son: la densidad del suelo, cantidad de agua que contenga, el nivel de compactación ya que este influye proporcionalmente en la presión y las cargas que se ejercen en las partículas para llenar los vacíos en el suelo ya que a mayor grado de compactación las partículas de agua toman más tiempo en llenar los vacíos.

FIGURA 4 Curva de compactación con respecto a la retención hidráulica²⁴

Fuente: DURNER w y A. Peters, 2009



²⁴ DURNER w. Shyfit user's manual draft versión 0.24, November 10, 1998.

Uno de los campos con menos investigación, es el esfuerzo que genera las partículas en las curvas. La cual busca proyectar la energía requerida del agua para llenar las partículas. Observamos en la figura 6 que existe cierta diferencia entre el contenido volumétrico de agua inicial y final en las tres curvas expuestas. Esto se debe a la retracción que el material experimenta en los diferentes procesos, variando su volumen inicial (variación estructural), siendo variables según su condición.

Para la determinación de las curvas de humedad se toman diferentes muestras de suelo en profundidades distintas, a las cuales se analizarán puntos de variación de humedad respecto a la pérdida de peso del mismo, su principal medio de estudio es la capacidad de un suelo o material poroso en retener agua en función de la succión.²⁵

7.1.1 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica de los suelos constituye un parámetro de gran importancia ya que describe la movilidad del agua subterránea o superficial, propiedad adyacente de los medios porosos que dependen de la impermeabilidad intrínseca, de la porosidad del medio y del grado de saturación que este tenga²⁶ ya que indica la dirección de recorrido que toma una partícula de agua en los vacíos del suelo.

En un suelo el agua que ocupa los espacios vacíos generalmente se encuentra distribuida en una serie de zonas verticales húmedas las cuales conllevan un tratamiento diferente a la variable de conductividad hidráulica, definiéndose en dos tipos la conductividad hidráulica en suelos totalmente saturados y conductividad hidráulica en suelos parcialmente saturados²⁷

Esta medición que nos indica la dirección de recorrido que toma una partícula de agua en los vacíos del suelo, sirve como parámetro de medición de la cantidad de agua superficial y subterránea en suelos parcialmente saturados, que dependen las propiedades del fluido y el medio en que se encuentre.

La conductividad hidráulica es una propiedad clave que se obtiene a través de métodos de laboratorio o métodos de campo según el estado de suelo, como se muestra en la siguiente tabla.

²⁵ MARTINEZ FERNANDEZ, J. Medida de Curvas de retención de humedad en laboratorio y su estimación. Departamento de geografía. Universidad de Salamanca.

²⁶ BARBECHO Juan y CALLE Johana, Caracterización de la conductividad hidráulica de los suelos, 2012

²⁷ MEZA OCHOA Victoria Elena, Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. 2012.

Tabla 1 Métodos para determinar la curva de retención la conductividad hidráulica²⁸

Clase de método	Método	Equipo	Comentario
	1. Permeámetro de carga constante	ES	Se usan pequeños núcleos y columnas del suelo
	2. Permeámetro de carga variable	ES	Se usan pequeños núcleos y columnas del suelo
	3. Permeámetro oscilante	AE	Se usan pequeños núcleos y columnas del suelo. Solo es necesario agregar una pequeña cantidad de agua.
Método de laboratorio en suelos parcialmente saturados			Se usan columnas largas de suelo uniforme
	1. Método de infiltración	ES	
	2. Permeámetro de momento variable	AE	Se usan columnas cortas de suelo uniforme
Método de campo con nivel freático	1. Hoyo con barrera	ES	Muestras de suelo bajo el nivel freático
	2. Piezométrico	ES	Muestras del suelo en la vecindad de la base abierta Muestras del suelo entre las dos
	3. Dos pozos	ES	
			perforaciones
	4. Bombeo de pozos	EPP	Usadas en pruebas de acuíferos a profundidad Muestras del suelo entre las líneas del drenaje
	5. Drenaje de tierra	ES	

²⁸ GABRIELS Donald, LOBO Deyanira L. y PULIDO Mansonia M, Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos, Gabriels et al. Venesuelos 14:7-22

Método de campo sin nivel freático	1. Permeámetro de hoyo perforado	ES	Muestras de suelo en la vecindad de la superficie húmeda
	2. Inverso del hoyo con barrera	ES	Muestras de suelo en la vecindad de la superficie húmeda
	3. Permeámetro con entrada de aire	AE	Muestras de suelo dentro del tubo aislado
	4. Infiltrómetro de disco	ES	Muestras de suelo cercana a la superficie
	5. Goteo	ES	Muestras de suelo cercana a la superficie
	6. Sorptividad	AE	Muestras de pequeño volumen (También puede clasificarse como un método de laboratorio con suelos parcialmente saturados) Usados en pruebas de baja permeabilidad (También puede clasificarse como un método de campo con nivel freático)
		AE	
	7. Infiltrómetro de presión		
	8. Infiltrómetro de doble anillo	ES	Muestras de suelo cercana a la superficie
ES	Equipo simple, usualmente encontrado en los laboratorios de suelos o fácilmente fabricable. Los métodos de campo usualmente requieren perforación		
AE	Aparato especial, requiere talles para facilitar su ensamble		
EPP	Equipo de perforación de pozos		

Fuente: ORDUZ, Nidia, MULOZ, Jose, COLMENARS, Julio, DONADO, Leonardo. Análisis de la influencia de la distribución de tamaño de partículas en la conductividad hidráulica en arenas limpias, XI Jornadas Geotécnicas de la ingeniería en Colombia.²⁹

Las partículas de suelo nos son de fácil medición por la discontinuidad de los vértices, por esta razón su clasificación es basada en el diámetro que pasa en los tamices.³⁰

Para definir el tipo de suelo que se está estudiando, es importante entender que estos dependen totalmente de la fase en la que se encuentre; los suelos

²⁹ ORDUZ, Nidia, MULOZ, Jose, COLMENARS, Julio, DONADO, Leonardo. Análisis de la influencia de la distribución de tamaño de partículas en la conductividad hidráulica en arenas limpias, XI Jornadas Geotécnicas de la ingeniería en Colombia.

³⁰ DONADO GARZON Leonardo David, Modelo de conductividad hidráulica en suelos, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2014.

saturados, por ejemplo, son aquellos que se encuentran por debajo del nivel freático, bajo esta condición, el agua en los poros se encuentra a una presión positiva es decir que ejerce una fuerza positiva, de igual magnitud y en todas las direcciones.

Por otro lado, aquellos suelos que se encuentran por encima del nivel freático, es la franja capilar, allí la mayor parte de los vacíos se encuentran llenos de agua de manera continua, aunque se puedan presentar burbujas (fase gaseosa discontinua) Cuando el suelo se encuentra en un estado de saturación en la franja capilar y su estado es próximo al 100% pero el suelo no se encuentra completamente saturado y en vez de esto, el agua que se encuentra allí se encuentra dentro de los vacíos y la presión que se ejerce allí es negativa, esto quiere decir que se presenta el fenómeno de capilaridad.³¹

Entre la zona del suelo seco y la franja capilar, existe una zona intermedia denominada como zona de dos fases, que corresponde a la zona del suelo parcialmente saturado, teniendo en cuenta su origen, los suelos parcialmente saturados pueden ser naturales o artificiales, allí la zona el agua y el aire se encuentran ocupando los poros, ambos de manera continua y el grado de saturación se encuentra en un intervalo entre el 20% y el 80%. La diferencia de presión entre los poros del suelo es negativa, pero es debida a la diferencia de presión entre ambas fases, es decir, a la presión del agua en los poros y la presión del aire en los poros³².

³¹ MEZA OCHOA Victoria Elena, Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. 2012.

³² MEZA OCHOA Victoria Elena, Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. 2012.

Tabla 2 Fases del suelo

SUELO PARCIALMENTE SATURADO	Fase líquida discontinua. La mayoría de los vacíos llenos de aire.	SUELO SECO	S --> 0%
	Fase líquida continua. Fase gaseosa continua.	ZONA DE DOS FASES	
	Fase líquida continua. Fase gaseosa discontinua. La mayoría de vacíos llenos de agua.	FRANJA CAPILAR	S --> 100%
SUELO SATURADO	Vacíos llenos de agua. Aire disuelto en el agua. Presión de poros positiva.	NIVEL FREÁTICO	

Fuente: Programa Sub Sectorial de Irrigaciones. Ministerio de Agricultura, México, DF, 2009.³³

La estructura interna que presentan los suelos y su ubicación como se muestra en la figura 8 es un aspecto de gran importancia en el comportamiento mecánico de estos. Teniendo en cuenta esto se puede decir que la ley de Darcy (ecuación fundamental que describe el movimiento del agua en el suelo, al relacionar la proporción de flujo entre la resistencia de la matriz del suelo para fluir el agua y las fuerzas que actúan en cada elemento o unidad de agua del suelo) es válida para el flujo de agua en medios parcialmente saturados, siempre y cuando se tenga en cuenta la dependencia de la conductividad hidráulica con el contenido de humedad.³⁴

7.1.2 Humedad en el suelo

Los suelos contienen diferente cantidad de agua dependiendo de su textura y estructura, después de un evento de lluvia o de riego, hay un rápido movimiento descendente gracias a la fuerza de gravedad. Durante este proceso, la humedad del suelo disminuye continuamente, la velocidad en la que desciende el agua está directamente relacionada con la conductividad hidráulica del suelo, esto quiere decir que el drenaje es más rápido en suelos arenosos en comparación con suelos arcillosos. Como consecuencia de este

³³ Programa Sub Sectorial de Irrigaciones. Ministerio de Agricultura, México, DF, 2009

³⁴ BARBECHO Juan y CALLE Johana 2009 op 34.

movimiento y del consumo de agua por la evapotranspiración, el contenido de humedad en el suelo disminuye con el tiempo³⁵.

7.1.3 Humedad Gravimétrica

Se considera como la cantidad de masa de agua relativa a las partículas de masa en un suelo seco, en ocasiones se entiende como contenido gravimétrico de humedad. El termino suelo seco es definido como el suelo secado a un estado de equilibrio en un horno a temperaturas de 105 °, sin embargo, esto varía según su textura como es el caso de las arcillas en donde se puede apreciar cantidades de humedad en un estado de secado incluso a temperaturas mayores. No obstante, el suelo secado a temperatura ambiente generalmente contiene mayor humedad que el que es secado en un horno, gracias a un fenómeno de absorción de vapor de humedad generalmente conocido como higroscopicidad.³⁶

$$W = \frac{M_w}{M_s}$$

7.1.4 Humedad Volumétrica

La humedad volumétrica se difiere a partir de la relación entre el volumen del agua (va) y el volumen total o aparente del suelo (vt) estando seco. en suelos arenosos, el contenido de humedad volumétrica en un estado de saturación esta entre el 40-50% mientras que en un suelo de textura media está más o menos entre el 50%, en cambio en suelos arcillosos puede estar en el orden del 60%. En otras texturas el contenido relativo de este puede exceder la porosidad del suelo seco ya que suelos como los arcillosos tienden a inflar al humedecerse.

7.1.5 Densidad aparente

La densidad aparente de un suelo se define como la relación entre la masa de los sólidos y el volumen total que ocupan incluyendo el espacio poroso entre las partículas. Como los suelos están formados por partículas individuales, no se produce un relleno total del volumen, al compactar un suelo se produce una reducción de sus vacíos lo que deforma el suelo. Esta deformación está formada por la reorganización de las partículas debido al deslizamiento entre ellas. Entonces un cambio en la porosidad significa un aumento en la densidad aparente del suelo.

³⁵ ZOTARELLI Lincoln, DUKES Michael y MORGAN Kelly, Interpretación del contenido de humedad del suelo para determinar capacidad de campo y evitar riego excesivo en suelos arenosos, utilizando sensores de humedad, Servicio de Extensión Cooperativa de la Florida, Instituto de Alimentos y Ciencias Agrícolas, Universidad de la Florida. (UF/IFAS). Fecha de primera publicación: January 2013. Revisado February 2019.

³⁶ HANSEN, Gretel, determinacion de humedad gravimetrica de suelos. su correlacion con sensores de humedad, Centro de Estudios Hidro-Ambientales, 2010.

7.1.6 Capacidad de campo

La capacidad de campo nos indica la capacidad de agua que hay dentro de un suelo, después de que se drena el agua y cuando la velocidad del movimiento desciende del agua disminuye considerablemente. Este valor recibe el nombre de capacidad normal de campo, capacidad normal de humedad, capacidad de retención de agua y agua suspendida. Este valor se puede expresar en porcentaje del peso de suelo seco y se adapta a suelos bien estructurados donde el drenaje del exceso de agua se da de manera rápida.³⁷

7.1.7 Curva de retención de humedad del suelo

La curva de retención de humedad de un suelo nos permite determinar el porcentaje de volumen de agua que este suelo tiene versus la succión que se presenta en el mismo. Esta curva básicamente depende del contenido de materia orgánica que tenga el suelo, su estructura y textura.³⁸

A continuación, se describen 2 métodos para determinar la curva de retención de humedad del suelo:

- **Determinación en Laboratorio:** Para establecer la curva, en el laboratorio, las muestras de suelos se someten a diferentes presiones (0.1, 0.3, 1, 5, 10 y 15 atm, por ejemplo) y cuando se llega al equilibrio, se establece la humedad presente en ese suelo, luego se cambio a términos de volumen, en escala logarítmica y en la aritmética se coloca el % de humedad. De acuerdo a esto se establece el contenido de humedad en cualquier momento.
- **Determinación mediante modelos matemáticos:** Generalmente el número de puntos medidos para generar la curva de retención de humedad resulta una cantidad reducida debido al trabajo de campo y laboratorio, así como los costos requeridos. Para facilitar por medio de modelos analíticos la determinación de la curva, se comparan las propiedades de los suelos y se interpolan los datos que no se tienen para desarrollar el modelo de flujo de la zona no saturada. El modelo más utilizado para generar la curva de retencion de humedad, método empírico, es el de Van Genuchten, que se divide en cuatro fases según la relación funciona: función error, potencial, exponencial y coseno hiperbólico.³⁹

³⁷ JUAREZ BADILLO, Eulalio RICO RODRIGUEZ, Alfonso, Libro Mecanica de suelos – Tomo III, Limusa, 2010

³⁸ METER GROUP, EUROABC Blog de lisímetro, curva de retención de humedad de una arcilla, 2014.

³⁹ G. LÓPEZ-Canteñs , J. HERRERA-Puebla, A. OSTOS-SANTOS, L. LIZARRAGA-MENDIOLA y J. HERNÁNDEZ-Avila, Aplicación de modelos matemáticos para la obtención de la curva de retencion de humedad del suelo, Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5. Carretera México-Texcoco. C.P. 56230. Chapingo, México.

Muchos autores utilizan una función potencial para caracterizar la retención de humedad del suelo. El modelo de Van Genuchten con la restricción $m=1-1/n$ tiene la siguiente ecuación:

$$Se = \frac{1}{[1+(\alpha h)^n]^m}$$

El modelo de Van Genuchten (1980) ha sido utilizado con éxito por varios investigadores; Ruiz et al. (2006) compararon los modelos de Gardner, Brooks y Corey y Van Genuchten para 173 curvas de retención de humedad de diferentes agrupamientos de suelos, siendo en todos los casos el modelo de Van Genuchten el que obtuvo menor suma de cuadrados residuales media; también Ruiz (1997) ajustó 26 curvas de retención de humedad correspondientes a un suelo Ferralítico Rojo (Ferralsol) a los modelos de Gardner y Van Genuchten obteniéndose una suma de cuadrado residual menor en 2.5 veces para el modelo de Van Genuchten; López-Canteñs et al. (2010) recopilaron 570 muestras de 24 diferentes suelos y regiones de Cuba, y en su estudio resultó que el modelo de Van Genuchten con la condición de $m = 1-1/n$ fué el que mejor se adaptó a las condiciones evaluadas, con suma de cuadrados residuales entre 0.05×10^{-3} y 2.86×10^{-3} g g⁻¹ y r^2 mayor que 0.92.

7.2 MARCO CONCEPTUAL

7.2.1 Tensión superficial

La tensión superficial puede definirse como la fuerza que ejerce un líquido sobre una determinada superficie debido a la existencia de una atracción no compensada hacia el interior del mismo sobre las moléculas individuales de la superficie. Es la forma en la que se refleja la cohesión entre moléculas en un líquido⁴⁰.

La tensión superficial del líquido se comporta como una membrana en tensión, según la teoría de atracción molecular, las moléculas de un líquido que se encuentran considerablemente debajo de la superficie actúan una sobre otra por medio de fuerzas que son iguales en todas las direcciones. No obstante, las moléculas que se encuentran cerca de la superficie tienen una mayor atracción entre sí, que las presente entre moléculas que están debajo de ella.

Por lo que, en la superficie una molécula esta atraída hacia el volumen, esto produce una superficie de líquido que actúa como una membrana estirada. Gracias a este efecto de membrana, cada porción de la superficie del líquido genera tensión sobre porciones adyacentes o sobre objetos que están en

⁴⁰ MORALES, Maia Maitena Tensión superficial: fenómeno sencillo, fenómeno más que observado, pero tantas veces desconocido por su nombre, s.f.

contacto con la superficie. Esta tensión se define como tensión superficial, y tiende a disminuir al aumentar una temperatura. Otras manifestaciones de tensión superficial incluyen el exceso de presión en y sobre la presión atmosférica como es el caso de tierra arenosa fina⁴¹. La tensión superficial resulta ser imprescindible para entender fenómenos como la capilaridad por lo cual resulta de gran importancia conocer el valor de dicha propiedad para algunas aplicaciones.

7.2.2 Succión en suelos

La succión en suelos, fue usado para representar la deficiencia de presión en el agua de poros de algunos suelos saturados o no saturados, que tenían la capacidad de absorber agua si se le adicionaba está a la presión atmosférica.

El término succión o potencial de agua designa al componente del estado de tensiones que tiene en cuenta aquellos efectos de superficie capaces de retener agua dentro de la estructura de un suelo. Así, el efecto de la succión en un suelo no saturado es equivalente al de una presión exterior aplicada. La diferencia entre presión de aire de poros y presión de agua de poros se define como la succión matricial.

Que, a su vez, se define como la diferencia entre la presión del aire y la presión del agua en los poros del suelo. Succión equivalente obtenida mediante la presión parcial del vapor de agua en equilibrio con una solución idéntica en composición al agua del suelo.

El valor de esta succión matricial depende de la tensión superficial y el radio de curvatura. Cuando el grado de saturación disminuye, el menisco se retrae en espacios de poros pequeños donde el radio de curvatura del menisco se reduce y, de esta manera, la succión matricial se incrementa. Debido a los poros pequeños, se desarrollan succiones matriciales más altas en suelos arcillosos más que en los suelos granulares. El flujo de agua a través de los suelos no saturados se controla por el gradiente del potencial de agua total. Y este a su vez puede expresarse como la suma de tres componentes: a) Potencial gravitacional, causado por la elevación del agua del suelo con respecto a un nivel de referencia. b) Capilar o potencial matricial, causado por efectos de tensión de superficie. c) Potencial osmótico, causado por la concentración de iones disueltos en el agua del suelo.

Para un suelo no saturado con el aire de los poros a presión atmosférica, el potencial matricial está dado por la succión matricial, multiplicado por la unidad de peso del agua.

⁴¹ TORRES-PAPAQUI, Juan Pablo Tensión superficial, Departamento de astronomía Universidad de Guanajuato.

Por analogía, el potencial osmótico dividido por la unidad del peso del agua es llamado succión osmótica. La suma de la succión matricial y la succión osmótica se define como la succión total. Evidencias experimentales sugieren que la resistencia al corte y el comportamiento del cambio de volumen de suelos no saturados son dependientes de la succión matricial más que de la succión total. De esta manera, el comportamiento de tensión-deformación depende de la succión matricial mientras que el flujo de agua depende del gradiente de la succión total (más efectos gravitacionales).⁴²

7.2.3 Curvas de humedad

La curva de la relación entre la tensión de humedad del suelo y el contenido de humedad del suelo se llama retención de humedad o de las características de humedad del suelo y muestran la evolución que tiene el contenido en agua con la succión del suelo. Su composición depende de la textura, estructura del suelo y contenido en Materia Orgánica.

La Curva de Conductividad Hidráulica determina cómo varía la Conductividad Hidráulica, desde el punto de saturación hasta agua higroscópica, con la succión o el Contenido en Agua.⁴³ y se utilizan para determinar un índice de la humedad disponible en el suelo y clasificar los suelos en base a esta; para determinar el espacio poroso drenable para el diseño de drenaje; para comprobar los cambios en la estructura de un suelo; para determinar la relación entre tensión de humedad del suelo y otras propiedades físicas de un suelo como lo son la conductividad y retención.

Conocer la CRH y la CCH tiene un gran número de aplicaciones. Es importante realizar una caracterización del suelo siempre que se esté trabajando con él, o dónde tenga un papel importante.

Hay distintos métodos para determinar la CRH y la CCH. Muchos de ellos utilizan muestra alterada, cosa que puede llevar a determinaciones de las propiedades físicas poco representativas del suelo real. Es por este motivo que cuando se tenga que determinar una CRH y una CCH se escoja un método que utiliza muestra inalterada.

El sistema Hyprop, es capaz de determinar la CRH y la CCH simultáneamente con muestra inalterada. Además se ha demostrado que caracterizando el suelo con este sistema, los parámetros hidráulicos resultantes son más representativos que si se utilizan métodos que utilizan muestra alterada⁴⁴

⁴² CAÑERO, Ingrid, Comportamiento de suelos no saturados. Estado del conocimiento p.17-18

⁴³ KLEBER CALLE, Jaime Proaño. Óp, cit.

⁴⁴ LABFERRER, Óp, cit.

7.2.4 Capilaridad del suelo

Es una propiedad de los fluidos que se deriva de su tensión superficial, la cual, a su vez, depende de la cohesión del fluido, y que le confiere la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar. Este fenómeno se presenta debido a la tensión superficial, debido a que del mismo un líquido asciende por tubos de pequeño diámetro y por entre láminas muy próximas.⁴⁵

Aunque no siempre ocurre así debido a que la atracción entre moléculas iguales (cohesión) y moléculas diferentes (adhesión) son fuerzas que dependen de las sustancias. Esto causa que el menisco tenga una forma tenga una forma cóncava cuando el líquido está en contacto con una superficie vertical. Este es el mismo efecto que causa que materiales porosos materiales porosos absorban líquidos.

Estos se forman gracias a que los vacíos en los suelos tienen ancho variable y se comunican entre sí formando un enrejado. Si este enrejado se comunica por abajo con el agua, su parte inferior se satura completamente. Más arriba el agua solo ocupa los pequeños vacíos y los mayores quedan con aire.

Esa fracción de agua que ocupa los microporos, se mantiene en el suelo gracias a las fuerzas derivadas de la tensión superficial del agua. Es aquella que se eleva por encima del nivel en el cual la presión es igual a la atmosférica, hasta la zona de aireación no saturada. Esto quiere decir que la capilaridad del agua dentro de un suelo, produce unos esfuerzos de tensión los cuales generarán la comprensión de este. Para que se presente la capilaridad del agua freática en un suelo, se debe tener en cuenta que el suelo debe ser fino de tal manera que los poros que haya entre las partes sólidas del suelo, sean tan pequeñas como un tubo capilar.

Un aparato común usado para demostrar la capilaridad es el tubo capilar. Cuando la parte inferior de un tubo de vidrio se coloca verticalmente en un líquido como el agua se forma un menisco cóncavo. La tensión superficial succiona la columna líquida hacia arriba hasta que el peso del líquido sea suficiente para que la fuerza gravitacional sobreponga a las fuerzas intermoleculares.

7.2.5 Humedad en los suelos

Se define como la relación existente entre el peso del agua y el peso de los sólidos en un volumen dado de suelo. El contenido de la humedad que puede presentar un suelo es la relación del cociente del peso de las partículas sólidas y el peso del agua que guarda, esto se debe expresar en términos de porcentaje.; este contenido está formado por la suma de sus aguas libre, capilaridad e higroscópica.

⁴⁵ SAENZ LLANO, Juan José, Mecánica de suelos, España, 1975.

La humedad del suelo puede expresarse gravimétricamente, con base en la masa, o volumétricamente con base en el volumen, la humedad gravimétrica es la forma más básica de expresar la humedad del suelo, en cambio la humedad volumétrica, por lo general, se calcula como un porcentaje del volumen total del suelo.

7.2.6 Saturación

Referente al contenido volumétrico en relación a los vacíos de agua del suelo cuando prácticamente todos los espacios están llenos de agua. Cuando los suelos están bien drenados es un estado temporal ya que el exceso de agua drena de los poros grandes por influencia de la gravedad para ser reemplazada por aire.

7.2.7 Agua Desionizada

El agua desionizada o desmineralizada es llamada así porque se le han quitado, mediante resinas de intercambio iónico de lecho mixto, los cationes, como los de sodio (Na), calcio (Ca), hierro (Fe), cobre (Cu), y aniones como el carbonato, fluoruro, cloruro, etc. Esto significa que al agua se le han quitado todos los iones excepto el H^+ , o más rigurosamente H_3O^+ y el OH^- , pero puede contener pequeñas cantidades de impurezas no iónicas como compuestos orgánicos.

Es parecida al agua destilada en el sentido de su utilidad para experimentos científicos, por ejemplo en el área de la química analítica donde se necesitan aguas puras libres de iones interferentes⁴⁶.

Es utilizada en gran medida en las diversas pruebas analíticas o ensayos generales de laboratorio. Además, se caracteriza por su bajo contenido de contaminantes inorgánicos ya que se produce mediante destilación múltiple o desionización u osmosis inversa y luego una destilación. Su conductividad debe estar a menos de 1 (equivalente a menos de 0.5 ppm de sólidos disueltos y su pH no se especifica debido a su alta pureza.

7.2.8 Hyprop

Es un mineral de arcilla, con la composición química $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, es un mineral tipo silicato estratificado, Este tipo de arcilla es utilizada de forma calcinada, en temperaturas entre 500°C e 900°C para producir metacaulin, un material de propiedades puzolanicas dentro del concreto a base de cemento portland. Así mismo en un reciente concepto de concretos eco sustentables, los llamados geo polímeros.⁴⁷

⁴⁶ BRETTIS, Distribución industrial, Madrid, España.

⁴⁷ Universidad Industrial de Santander, Boletín de Geología No. 2, Facultad de petróleos, Departamento de Geología.

7.2.9 Diatomeas

Las diatomeas son un grupo de algas unicelulares extremadamente heterogéneas pero con características comunes que, no obstante, aún mantienen una ardua discusión en el ámbito de la clasificación científica. Aportan rigidez y resistencia al suelo, siendo muy importantes para las obras de ingeniería civil, debido a su evolución son capaces de moverse, pero sobre todo a través de superficies, como por ejemplo dentro de los sedimentos, gracias a una estructura llamada rafe.⁴⁸

7.2.10 Roca Marga

Es una roca sedimentaria mixta, que está compuesta por aproximadamente un 65% de carbonato cálcico y por minerales arcillosos, se caracterizan por un alto contenido de diatomeas, las cuales aportan resistencia al esfuerzo cortante. Su utiliza principalmente para la fabricación de cementos, ya que por su alto contenido de carbonato cálcico y arcilla (esmectitas) no puede ser utilizada para la fabricación cerámica.⁴⁹

48 GIL LOPEZ, Blanca Emilse, Fitolitos en cálculo dental de poblaciones Tempranas del valle geográfico del río Cauca (500 a.C. – 500 d.C.). Aproximación a la paelodieta, Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Maestría en Antropología, Bogotá, Colombia 2011

49 GONZÁLEZ J.L, MÉRIDA J, CORRAL L. y PANEQUE G, Caracterización de rocas calcáreas sobre las que se desarrollan suelos forestales de la reserva de grazalema (Cádiz), Estudios geol., 43: 387-392 (1987)

8 OBJETIVOS

8.1 OBJETIVO GENERAL

Obtener las curvas de retención y conductividad hidráulica para diferentes muestras de un suelo arcilloso (caolín), mezclados con diferentes porcentajes de diatomeas y comparar estas curvas determinando el cambio de la retención y conductividad en las muestras.

8.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Generar un estado del arte para poder apropiarse del conocimiento necesario para el desarrollo de la investigación.
- Evaluar la medición simultánea de la función de retención de agua y conductividad hidráulica en el equipo.
- Determinar el tiempo de medición, porcentaje de retención de agua en las muestras y el cambio en la porosidad del suelo de acuerdo al porcentaje de diatomeas.

9 ALCANCES Y LIMITACIONES

9.1 ALCANCES

- Se procederá a hacer las curvas de retención y conductividad a 4 muestras de suelo.
- Registro en continuo del peso, potencial hídrico y temperatura de la muestra.
- Obtención de curvas completas en un periodo corto de tiempo.

9.2 LIMITACIONES

- La falta de información sobre ensayos realizados en el Hyprop, ya que es un equipo relativamente nuevo, en el que se han realizado pocos ensayos con arcillas.
- A causa de apagones repentinos las muestras que se encontraban en medición en ese momento se perdieron ya que el equipo se detenía y paraba la lectura
- Las muestras que se utilizaron son alteradas, en general en Hyprop es más preciso en muestras de suelo inalteradas.

10 METODOLOGIA

Se utilizaran 4 muestras de caolín las cuales se mezclaran con diferentes porcentajes de diatomeas, para obtener las curvas de retención y conductividad de cada uno de estos suelos.

Las mediciones generan un tiempo de tres a cinco días en lograr datos confiables, lo cual implica tener suficiente disposición de los laboratorios en la universidad para tomar registros de avances en las gráficas generados, aunque. El equipo es completamente automatizado requiere consultas diarias para evaluar si el procedimiento de extracción de vacíos en los tensiómetros fue el adecuado, si no es así. Es mejor detener el ensayo y hacer las correcciones pertinentes.

Sitio de acopio. Las muestras son caolín proveniente de la Universidad Católica de Colombia, se utilizó este material ya que las arcillas son los suelos predominantes en la ciudad de Bogotá y dado esto se desarrolló este análisis .

10.1 ALISTAMIENTO DE MUESTRA

Para empezar el análisis de las muestras se debe determinar el tipo de suelo a estudiar. El comportamiento y el modo de extracción a la que fue sometida, es muy distinto analizar una muestra extraída en laboratorio que una extraída de campo.

Cada muestra estudiada debe cumplir los siguientes parámetros

1. Muestra en laboratorio:

- Se debe medir en porcentaje el contenido de suelos de la muestra
- Debe cumplir un volumen mínimo de 250 centímetros cúbicos, si la muestra pierde volumen por la adsorción de agua se debe llevar al volumen deseado colocando mas material en la muestra
- La saturación de la muestra debe ser mínimo de dos días y máximo de dos semanas, el tiempo de saturación varía el tipo de muestra. Entre el material sea mas grueso como las arenas, tardara menos la saturación. Pero si son materiales mas finos como las arcillas requieren una saturación más prolongada

2. Muestra en campo

- Se debe extraer del suelo una muestra mínima de 250 centímetros cúbicos, la cual no debe contener material vegetal ni residuos sólidos que alteren el análisis.
- La muestra después de ser extraída se debe llevar al laboratorio en el menos tiempo posible, tratando que la muestra no pierda humedad ni contenido del agua. Se debe llevar herméticamente y debidamente rotulada

- De la muestra extraída se debe sacar la cantidad necesaria para el anillo de muestreo son tener que hacer compactación de la muestra dentro de anillo. El suelo debe estar lo menos alterado posible
- Su saturación varia también de las características de suelo. No debe tener una aceleración en la saturación ni un contactó el chorro directo con la muestra.

Cada tipo de muestra se comporta distinto según sus componentes. Pero se puede definir que está completamente saturada cuando resalte un brillo propio en la cara superior de la muestra.

10.2 SATURACION PREVIA

Una saturación adecuada permite que las lecturas de retención y conductibilidad sean más confiables, para esto se requiere el siguiente procedimiento.

- Después de tener la muestra ya sea realizada en el laboratorio o traída de campo se comienza la saturación que es. Colocar la muestra en l anillo de muestreo de tal manera que la muestra no este suprimida ni compactada en el centro. En un recipiente con agua potable colocamos la parrilla de saturación la cual cuenta con unos orificios en todo su diámetro que permite el paso del agua a la muestra, encima de la parrilla de saturación se coloca un paño limpio de papel que no tenga pérdida de motas. Su función principal es permitir el paso de agua desde el recipiente al anillo de muestreo, si dejar que las partículas de suelo que se disuelven por estar en mayor contacto con el agua se pierdan y terminen en el fondeo del recipiente. Luego colocamos el anillo con la muestra encima de la parrilla con el papel filtro. Ajustamos de tal manera que se ejerza una presión entre los dos, y llenamos con tres cuartas parte de agua el recipiente. El contenido de agua depende el tipo de suelo, como se pueden analizar suelos muy adsorbentes también encontramos suelos que solo pueden adsorber una cantidad de agua y el resto de la muestra puede quedar seca. Por este motivo se debe llevar la muestra a la saturación más completa.
- En los días que la muestra se va saturando puede llegar a perder agua el recipiente, ya sea por una pronta adsorción del suelo o condiciones naturales, por lo cual se debe hacer seguimiento a la cantidad de agua en el recipiente hasta terminar el procedimiento de saturación.

10.3 DESGASIFICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS

Para la medición es de gran importancia reducir la cantidad de aire en el equipo, la porcelana de los ejes de tensión percibe cualquier cambio de presión en la muestra. Así mismo detendrá automáticamente la lectura ya que los datos

generados no serán confiables. Por tal motivo se debe hacer una desgasificación completa.

El equipo cuenta con seis jeringas, tres de reservorio y tres de vacío. Con estas jeringas se hace la desgasificación y el rellenado del equipo. Llenamos las jeringas con agua desionizada, la cual es escogida por no tener componentes minerales que alteren la medición.

Llenamos la jeringa entre veinte y veinticinco mililitros de agua desionizada, esta cantidad es la suficiente para permitir un buen vacío con el embolo. Si se llega a llenar más la jeringa la desgasificación sería más lenta y menos eficiente. Colocamos el dedo gordo de la mano menos hábil encima del orificio de la jeringa y con la otra mano jalamos el embolo de tal manera el vacío generado saque las burbujas que estén dentro del agua. Con las jeringas de vacío se realiza el mismo procedimiento con la diferencia que ellas tienen unos soportes laterales, la cual nos permiten una condición de vacío constante. Este procedimiento se debe repetir aproximadamente unas siete veces, de tal manera que cada vez que se jale el embolo salga las burbujas y se expulsen lentamente por el orificio de salida. El embolo de la jeringa no puede ejercer un vacío completo, generando pasos pequeños de aire. Si llegan a quedar pequeñas burbujas en las jeringas serán extraídas más adelante.

10.4 EJES DE TENSIÓN

El Hyprop funciona según las mediciones detectadas por la presión que ejerce el agua en los poros del suelo. Cada eje es de punta de porcelana con un cuerpo hueco. La porcelana permite receptar los cambios de presión en el suelo, esta presión puede ser medible, como el cambio de vapor de la muestra con respecto a la presión atmosférica superficial. esta información baja directamente a la unidad de censado que lo percibe como pérdida de agua en el eje del tensiómetro. Generando puntos promedios de medición y determinando una conducta constante del material. En las primeras horas de la medición se generan los puntos más confiables ya que la muestra de suelo pierde agua más rápido por tener el nivel freático más cerca de la superficie., Luego la evaporación es más lenta. En ese momento el tensiómetro más corto comenzara a determinar la perdida en la parte inferior con respecto al tensiómetro mayor que se encuentra en el lado superior, el método matricial de la succión con respecto a la perdida de vapor del suelo utilizado por el Hyprop FIT hace un promedio de la lectura inferior y superior en un mismo punto. Cada punto generado es dado por un tiempo preciso en los tensiómetros, cada punto se genera unas oscilaciones de un minuto aproximadamente. Determinado los cambios de presión por punto de los tensiómetros, se genera una lectura promedio entre los dos la cual es graficada inmediatamente el software, el alistamiento previo de los ejes es, colocarlos en saturación con agua desionizada con una antelación de un día, puede ser en la misma capucha donde viene

10.5 DESGASIFICACIÓN DE LOS EJES

Los tensiómetros al tener la cabeza de porcelana se concentran partículas de aire en sus poros, estas partículas no permiten el paso adecuado del agua al sensor, por tal motivo debe degasificar previa mente. Para esto se requiere tener por eje, una jeringa re reservorio, una jeringa de vacío y dos mangueras de diferente diámetro. Colocamos en las salidas de las jeringas las mangueras de tal forma que se produzca un menisco, el tensiómetro previamente saturado se conecta a las puntas de las mangueras con las jeringas, de tal manera que la punta con porcelana quede con la jeringa de reservorio y la de vacío quede con la punta enroscada del tensiómetro. Haciendo un tipo de sello entre las jeringas y el tensiómetro. Luego jalamos el embolo de la jeringa de vacío, produciendo que el gas retenido en la porcelana descienda y salga al eje de tensión hasta llegar a la jeringa de vacío, este procedimiento debe hacerse con los dos tensiómetros y se recomienda dejarlo en este estado de vacío contante aproximadamente tres horas.

10.6 DESGASIFICACIÓN DE UNIDAD DE CENSADO Y COLOCACIÓN DE LLENADOR DE FIJACIÓN

la unidad de censor sirve como lector de datos suministrados por la muestra y puerto de conexión al software. Este compuesto de dos orificios superiores los cuales se enroscan los ejes de tensión. Este equipo cuenta con un sensor en la parte interna, el cual percibe los cambios de presión según el tiempo. Cada sensor debe tener un o ring en la parte superior, el cual no permite que se produzcan presiones excesivas entre el sensor y la unidad de censado. A su vez controla el paso de partículas de suelo que provengan de la muestra. Esta parte suelo acumular grandes cantidades de burbujas de aire en su centro por tal motivo debe retirarse. En el kit de instrumento del Hyprop encontramos la unidad de fijación. La cual es echa de acrílico trasparente con una forma cilíndrica por fuera y una figura cónica en su centro, con una válvula de salida en la parte superior. La cual encaja en la unidad de censado y se ajusta con las pinzas de presión del mismo. El montaje de el llenado de fijación se realiza ajustando el accesorio al equipo de tal manera que no tenga entrada ni salida de are, luego con una jeringa de reservorio y la gotita se va llenando por la parte superior de una manera lenta. Con el fin de no producir las burbujas de aire en el centro. Colocamos el equipo inclinado y agregamos aproximada mente veintitrés mililitros de agua desionizada. al terminar el proceso introducimos la manguera de color azul en la válvula, sabemos que esta bien instalada cuando se produzca un leve ruido. Luego de tener toda la unidad de censado saturado realizamos un menisco en la salida de la muestra. Conectamos la punta de una jeringa de vacío y jalamos el embolo hacia arriba, de tal manera que se produzca un efecto de efervescencia en el interior de la unidad de censado. Expulsando las partículas de aire comprimidas en su interior este procedimiento tiene un tiempo de duración aproximando de tres horas. Cuando la unidad se encuentre totalmente liberada de burbujas

retiramos la unidad de fijación del sensor. Dejando el agua en la superficie. La unidad de censor después de este proceso debe ser detectada y calibrada en el software para poder tener las lecturas de los tensiómetros adecuadas.

10.7 AJUSTE Y CONECTIVIDAD DE LA BALANZA

El equipo contiene una balanza diseñada para la medición de las muestras, esta balanza cuenta con un tablero digital que nos permite acceder a varias opciones de funcionamiento, se requiere de este instrumento para medir la pérdida de agua que sufre la muestra durante el ensayo. Esta pérdida es sistemática, entre mas tiempo dure el ensayo pierde mas agua y el peso disminuye, esta balanza tiene una capacidad de cuatro mil gramos, determinamos con ensayos realizados en las muestra de caolín y diatomeas que el peso promedio que recibe la balanza esta entre los mil gramos a los mil cincuenta gramos al inicio de cada ensayo, al finalizar el ensayo puede llegar a perder entre cincuenta gramos a ochenta gramos, estos valores varían según el tipo de suelo y la temperatura ambiente de la muestra. Estos cambios de peso son graficados directamente en el Hyprop FIT, las lecturas se hacen directamente de la unidad de censado a la báscula y de la báscula al software, con unas pinzas de conexión. La calibración del equipo se encuentra más explícitamente en el manual de usuario.

10.8 HYPROP VIEW

Software desarrollado por METERGRUOP que permite hacer calibración de unidad de censado, tensiómetros y balanza, seleccionamos el modelo de la unidad de censado y realizamos reajuste en la unidad, luego colocamos de manera lenta los tensiómetros en la unidad debidamente desgasificados. Para esto view nos proporciona un asistente a ajuste, el cual nos permite visibilizar la fuerza ejercida en los tensiómetros. Entre mas fuerza de giro se utiliza para hacer el ajuste a la unidad de censado más alta será la presión en hPa del asistente, no se debe sobre pasar los rangos de tolerancia dado por el fabricante de tres mil hPa, cuando los tensiómetros estén ajustados de la manera correcta la iluminación de la unidad de censado estará en color blanco y podremos comenzar la medición de las muestras.

Este procedimiento requiere de un conocimiento amplio sobre el montaje e utilización de software de medición, por lo cual se recomienda dirigirse al manual de usuario del Hyprop.

10.9 MONTAJE DE MUESTRA DE CAOLÍN-DIATOMEAS

Las muestras analizar contienen diferentes cantidades de caolín y diatomeas, estas muestras son montadas directamente en laboratorio. Los porcentajes

utilizados varían según la cantidad de diatomeas, como las arcillas tienden a adsorber más cantidades de agua el volumen exacto de la muestra de doscientos cincuenta centímetros cúbicos no se pueden generar. Por lo cual se debe realizar para el montaje de la muestra

- En un recipiente completamente seco se monta la cantidad de material requerido para dar los porcentajes por muestra, esta cantidad debe ser lo suficiente para permitir llenar el anillo de muestreo y teniendo un exceso para poder enraizar la muestra
- Por ser muestra con un porcentaje de caolín alto se debe dejar en saturación aproximadamente dos semanas antes hacer el ensayo.

Luego de la saturación, se dispone al montaje de la muestra con todos los accesorios completamente desgasificados. Cada muestra se debe hacer las perforaciones adecuadas para que tenga un contacto directo con los tensiómetros,

Durante el proceso de lectura del Hyprop FIT, deben hacerse continuas revisiones al ensayo para determinar que no hubieron problemas en los montajes o en la lectura, al finalizar el ensayo se generaran una lectura de datos según cada muestra, estos gráficos serán comparados entre si para determinar el cambio en el comportamiento de suelos con caolín y diatomeas según la cantidad en porcentajes que contenga, por tal motivo se verificara la porosidad del material y la densidad del agua en las lecturas.

De los métodos teóricos conocidos se utilizará el de Van Genuchten para determinar las curvas de retención y conductibilidad, los pesos originales de la muestra serán determinados por el Hyprop, y la muestra final será secada al horno a ciento veinte grados por un día, cuando se generen las curvas se analizará el comportamiento de cada ensayo plasmando una tabla de resultados entre los ensayos.

11 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Tabla 3 Cronograma de actividades

No.	ACTIVIDAD A DESARROLLAR	MES SEMANA	sep					oct					nov					dic					ene					feb					mar					abril					mayo					FECHA FINAL (DD- MM-AA)	CONTROL DEL CUMPLIMIENTO	
			1 2 3 4					1 2 3 4					1 2 3 4					1 2 3 4					1 2 3 4					1 2 3 4					1 2 3 4					% DE EJECUCION	% POR EJECUTAR											
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3			4										
4	ANALISIS DE DATOS	T																																		07/07/2018	98	2												
4.1	MUESTRA 1RA CAPACITACION	T																																		23/08/2018	100	0												
4.2	MUESTRA 2DA CAPACITACION	T																																		16/03/2018	100	0												
4.3	MUESTRA caolin 100%	T																																		08/03/2019	100	0												
4.4	MUESTRA caolin 90 % diatomeas 10%	T																																		13/04/2019	100	0												
4.5	MUESTRA caolin 80 % diatomeas 20%	T																																		09/09/2018	100	0												
4.5	MUESTRA caolin 70% diatomeas 30%	T																																		13/03/2019	100	0												
5	DOCUMENTACION	T																																		16/12/2018	100	0												
5.1	MANUAL DE USO	E																																		25/11/2018	100	0												
5.2	GUIA DE LABORATORIO	E																																		09/12/2018	100	0												
5.3	REVISION DE INFORMACION	T																																		16/12/2018	100	0												
6	TERMINACION DE ENSAYOS	T																																		13/03/2018	100	0												
6.1	MANUAL DE USO TERMINADO	T																																		16/02/2019	100	0												
6.2	GUIA DE LABORATORIO TERMINADO	T																																		13/03/2019	100	0												
6.3	CONCLUSIONES	T																																		15/05/2019	100	0												
		T:teorico , L:Laboratorio																																				99.87	0.13											

Fuente: Propia

Los informes de laboratorios se realizaran en los tiempos estipulados en el semestre, llevando las muestras al laboratorio de plantas de la universidad Católica de Colombia para sus estudios, cada ensayo generado será una medición base para la realización de las curvas patrones. Se puede aclarar que las mediciones que se generan por principio no son las indicadas por el Hyprop, ya que. Las curvas de retención de humedad a medir son diferentes a las que el software está acostumbrado a medir, y en el manual las clasifica como curvas erróneas.

12 PRODUCTOS A ENTREGAR

En la siguiente tabla se indicarán cuáles son los productos a entregar y los tiempos estipulados para la entrega, teniendo en cuenta las fechas de la Universidad.

Tabla 4 Productos a entregar

PRODUCTOS A ENTREGAR		
TIPO	Nombre del producto	Fecha de entrega
Anteproyecto	Se entregara un CD con toda la información propuesta para la validación de los datos con la carta de aceptación del docente tutor	21/09/2018
Guia de Laboratorio	La realización de una guía de laboratorio donde se describe la metodología, marco teórico, procedimiento y pasos a seguir en laboratorio	18/05/2019
Manual de uso	Manual de uso del equipo Hyprop, para garantizar una buena manipulación y desempeño en la ejecución de los ensayos	18/05/2019
Documento Tesis	Documentación de la recopilación de datos, patrones de curvas, guías de ensayos	18/05/2019

Fuente: Propia

13 EQUIPOS

Gracias a la inversión realizada por la universidad católica de Colombia en equipos de investigación en el área de suelos, en los laboratorios se ejecutaran los ensayos de curvas de retención y potencial hídrico del suelo, los cuales se requieren para su medición un computador que permita la instalación del software del programa. El Hyprop se constituye de un equipo de medición con un sed de jeringas para vacíos, una balanza la cual va conectada directamente al computador, instrumento de extracción de muestras en campo, papeles filtros y agua ionizada.

El análisis competo de las curvas de retención y conductividad en muestra de suelo se generan con la unión de información de equipos como el Hyprop, Wp4c y el infiltrometro. Una muestra de suelo se estudia en condiciones de saturación y secado. El Wp4c mide las condiciones de humedad en muestras secas, el infiltrometro mide la capacidad de adsorción de agua en un suelo. El Hyprop determina la retención y evaporación de agua en muestras saturadas.

Para generar curvas de retención el Hyprop cuanta con tres equipos generales

- Multibalanza: balanza con una capacidad de carga de 4 kg, su función principal es medir la pérdida de peso que tiene una muestra. La conexión que tiene con la unidad de censado permite evaluar el tiempo y

peso inicial de una muestra, para proyectar las lecturas al Pc se conecta la Mutibalanza por medio Usb al equipo. Por defecto el software detectara el equipo.

- Jeringas, manqueras, fijador, placa de saturación: elementos requeridos en el alistamiento de la muestra. Antes de la saturación
- Censor de medición, tensiómetros, anillo de muestreo: instrumentos requeridos en la lectura de datos, estos van siempre conectados a la Multibalanza

Con un correcto montaje de la muestra se requiere la instalación de Hyprop view. El cual nos permite ajustar los tensiómetros, calibrara el equipo, ajustar parámetros iniciales, comienza la lectura integrando el Multibalanza con la unidad de censado.

Después del terminar el montaje se requiere la instalación del Hyprop FIT, el cual permite generar las curvas de retención, conductividad y k en los suelos. También nos permite conocer datos como densidad, porosidad, contenido volumétrico de agua, tiempo de secado.

14 PRESUPUESTO DEL TRABAJO

En este presupuesto se contemplaron todos los ítems que se tuvieron en cuenta a la hora de desarrollar el proyecto.

Tabla 5 Presupuesto

PRESUPUESTO GLOBAL DE ANTEPROYECTO		
ITEM		VALOR
1	INGRESOS	
	Auxilio o participación para la ejecución del trabajo	200.000,00
	Recursos propios(papeleria y fotocopias)	50.000,00
2	EGRESOS	
	Recursos Humanos-Honorarios y servicios	100.000,00
	Empleo del Hyprop, balanza y jeringas de vacíos	70.000,00
	Muestras empleadas para la ejecución de los ensayos	100.000,00
	Gastos empleados para los ensayos(agua ionizada)	200.000,00
	Imprevisto	30.000,00
TOTALES		750.000,00

Fuente: Propia

15 ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN Y DIVULGACION

Para la divulgación del proyecto se tendrá como premisa la presentación de este como requisito de grado, se contempla la opción de participar en foros, convenciones y espacios académicos, donde se pueda exponer el producto final y el análisis del mismo.

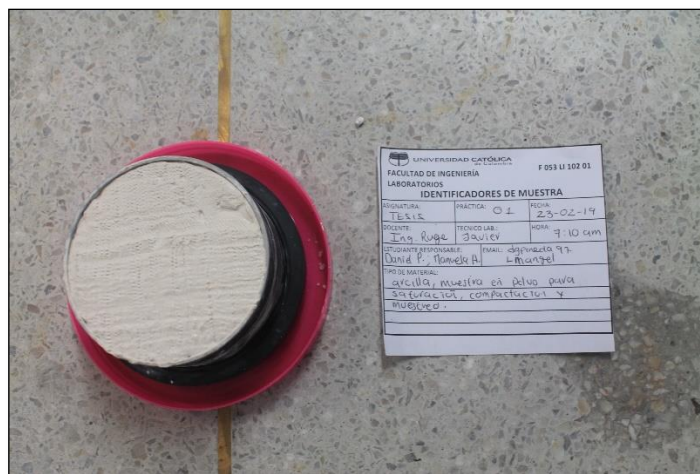
Aparte se dispondrá de toda la publicidad requerida para la divulgación del proyecto a nivel universitario.

16 RESULTADOS

16.1 MUESTRA 100% CAOLIN

El caolín es un mineral extraída de la caolita de los suelos, casi siempre se encuentra de un color blanco, pero también se puede encontrar de diversos colores, esto depende si este mezclado con otro tipo de suelo. Este caso se tomó una muestra competente inalterada de color blanco hueso.

FIGURA 5 Muestra 100% Caolin

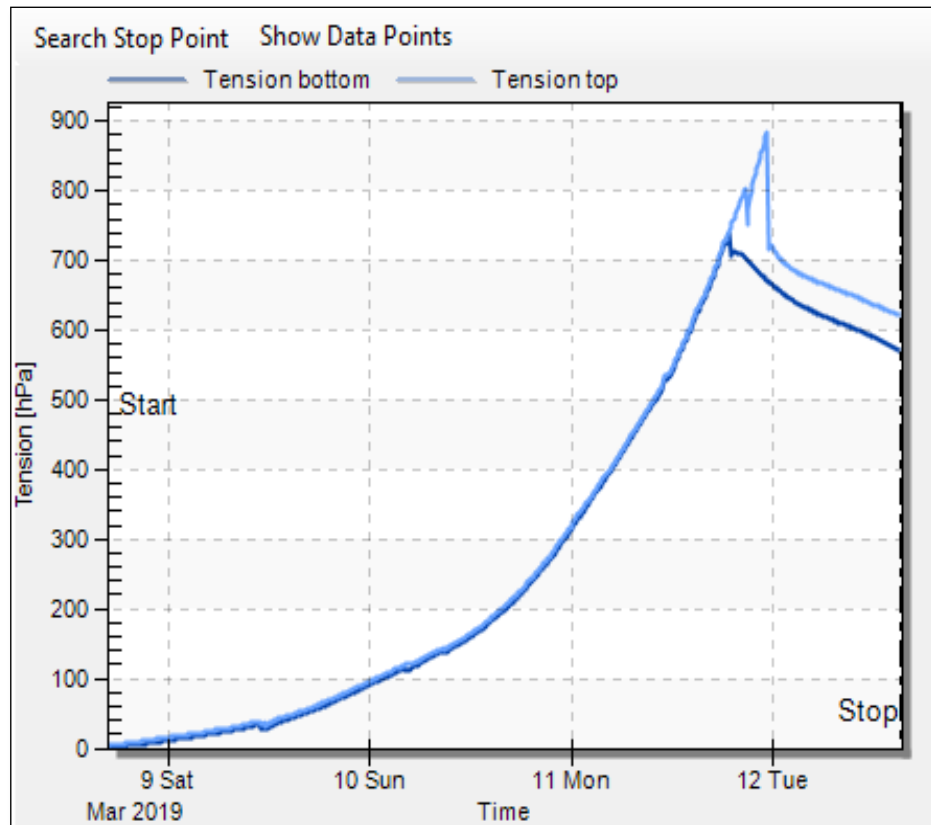


Fuente: Propia

Después de hacer diferentes montajes de muestras con otros tipos de suelo se determinó que un material como el caolín su tiempo de saturación es mucho mas corto. Claro ejemplo de esto es su utilización en la industria comercial el cual se utiliza como adsorbente de varios materiales, el volumen en seco de la muestra en el anillo disminuyó considerablemente después de colocarlo en saturación, por tal motivo se debió completar el volumen perdido con más muestra. Hasta llegar a sobre pasar el anillo de muestreo, el tiempo de saturación a brillo visible en la muestra concluyo a las veinticuatro horas, recortando el tiempo del ensayo, no obstante, se dejó la muestra en saturación tres días más para garantizar las indicaciones del fabricante. Después de terminar la saturación evidenciamos que la muestra es de textura blanda y poco compacta. Lo que impide el buen proceso de colocación en los ejes de tensión. Así mismo como el caolín es un agente de absorción de humedad también suelo perder muy rápido el contenido de agua dentro de ella. Por lo cual la muestra no fue diseñada afuera del anillo de muestre, en los primeros ensayos de saturación se evidencio que la muestra no debe ser realizada en cualquier otro recipiente que no sea el anillo de muestreo. Su textura es muy blanda y contiene un porcentaje superior de agua a comparación con el caolín.

En el momento de realizar las perforaciones no permitió generar los espacios para los tensiómetros

FIGURA 6 Grafica de tiempo vs tensión de la muestra 100% caolín

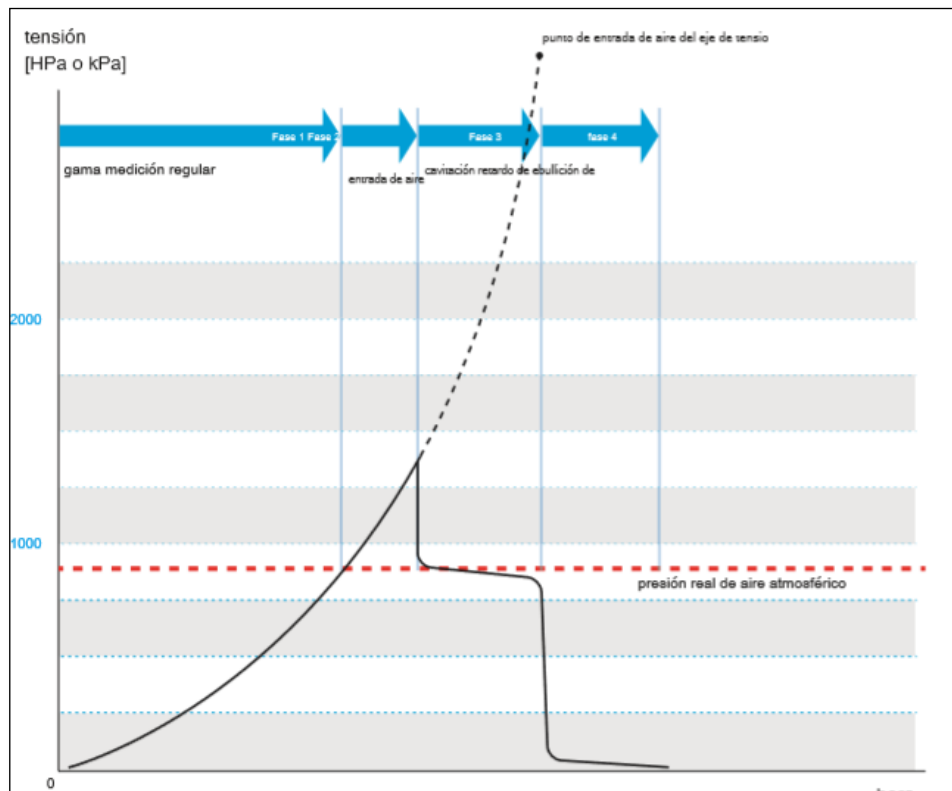


Fuente: Propia

16.1.1 GRAFICA DE INTERPOLACIÓN DE PUNTOS EN DATOS DE LA MUESTRA

La grafica muestra un comportamiento adecuado las trómeras tres fases de medición. La cuarta fase no se logra llegar a la adecuada

FIGURA 7 Grafica optima de resultados

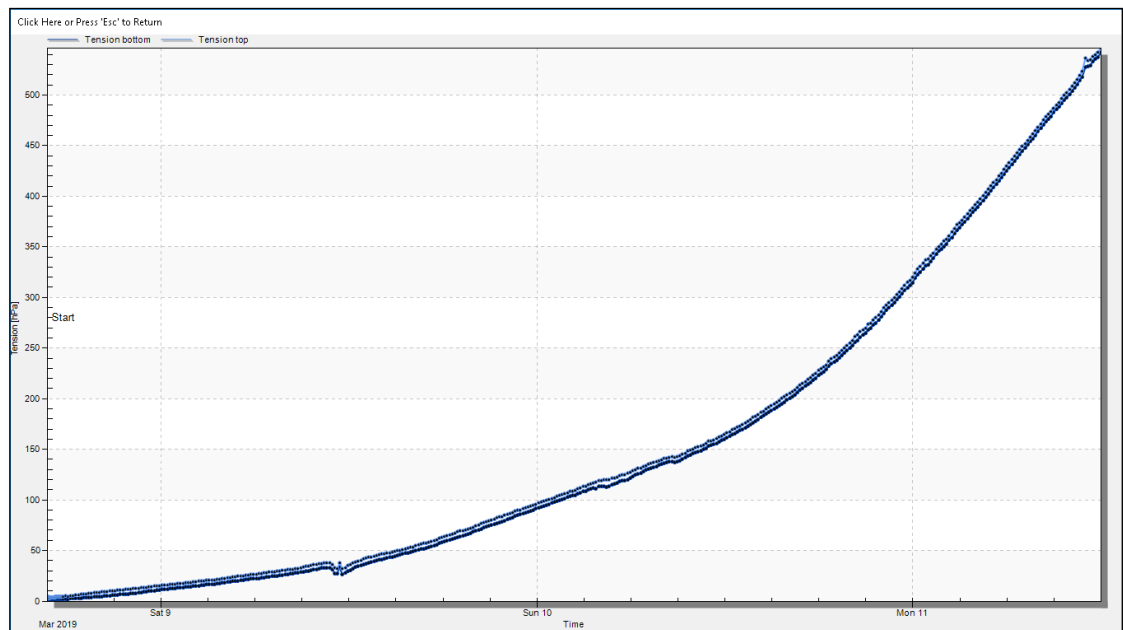


Fuente: Propia

Comparando con el resultado de una fase típica ensayada por el grupo meter se puede evidenciar similitudes en la fase do y tres, como un comportamiento atípico en la fase cuatro

16.1.1.1 FASE 1:

FIGURA 8 Fase 1 de la gráfica 100% caolín

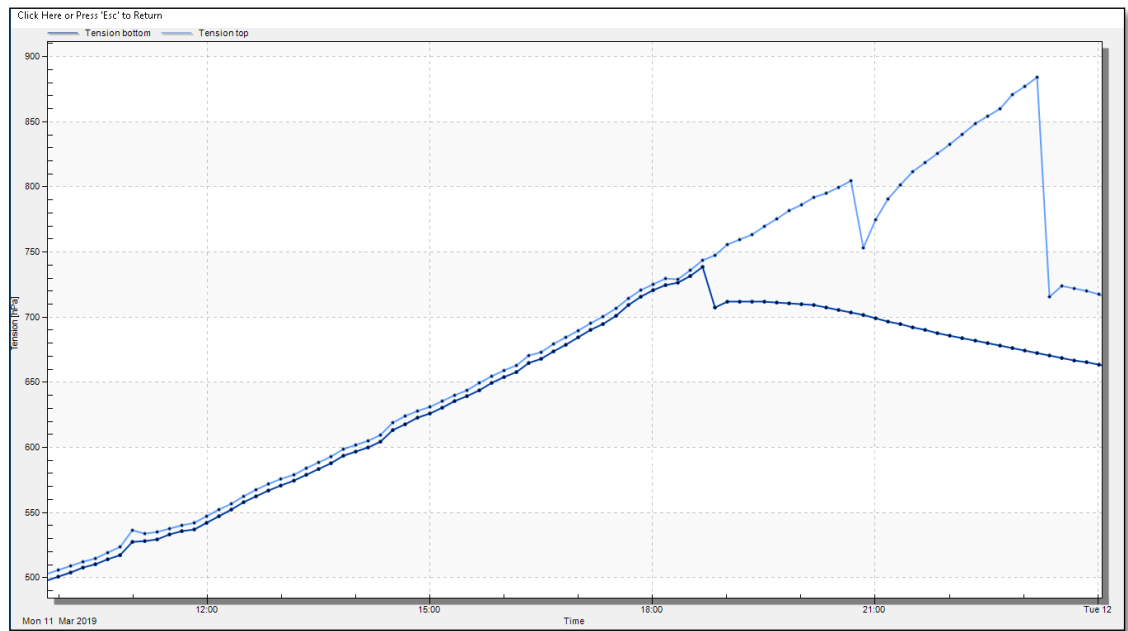


Fuente: Propia

La medición mantuvo una lectura exponencial entre los dos tensiómetros, los puntos generados durante el ensayo tienen similitudes parecidas. Evidenciando un buen montaje de la muestra en el censor. Teniendo pequeños resaltos imperceptibles a comparación de la cantidad de datos tomados. Definiéndolo como partículas de aire entre la muestra aun existentes, los cuales alteran la gráfica, pero sin generar cambio en las retenciones.

16.1.1.2 FASE 2:

FIGURA 9 Fase 2 de la gráfica 100% caolín

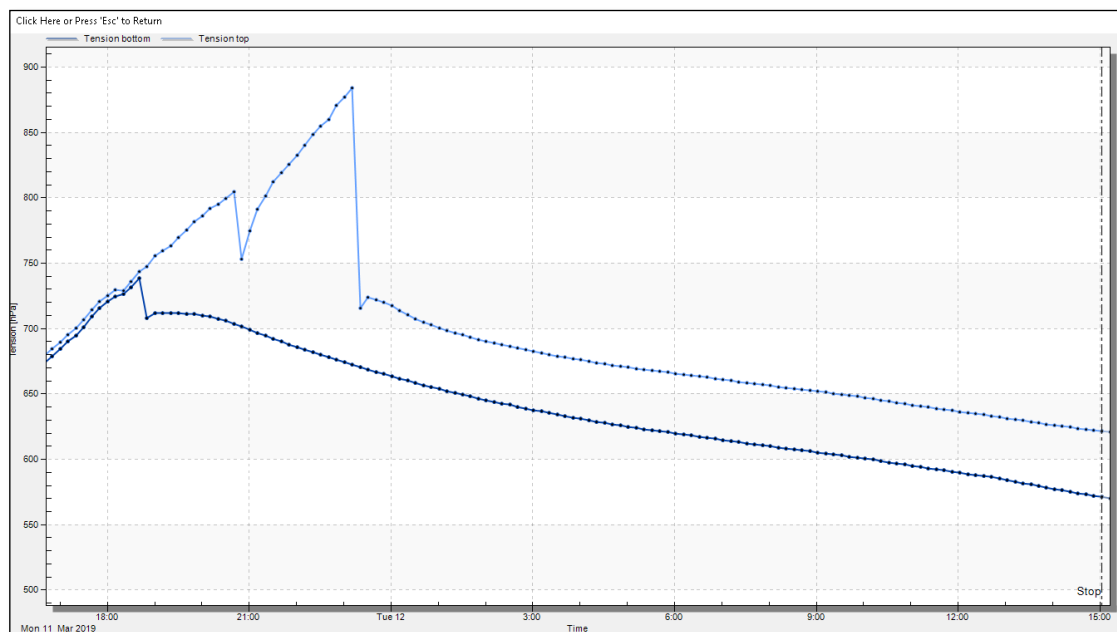


Fuente: Propia

El crecimiento de la presión sigue siendo de una forma exponencial. Pero denotamos que el tensiómetro superior sigue generando lecturas hasta los 884 hPa a comparación del tensiómetro inferior que genero lectura hasta los 738 hPa, este cambio en la lectura se define como la perdida acelerada de agua en la superficie a comparación con el centro que retiene una pequeña cantidad de agua

16.1.1.3 FASE 3:

FIGURA 10 Fase 3 de la gráfica 100% caolín



Fuente: Propia

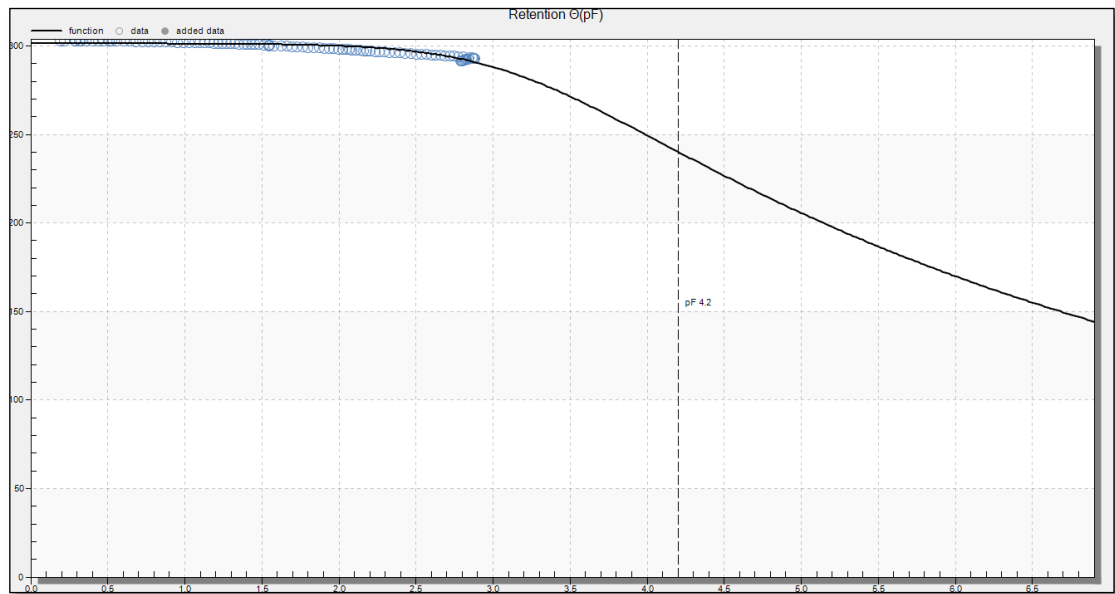
Las tensiones superficiales en el tensiómetro superior son mayores, teniendo una caída significativa pasada las tres horas de entrada de aire en la muestra. El vapor de agua concentrado en la parte inferior de la muestra se concentra y si perdida de manera continua. Generando separación entre las lecturas del tensiómetro, una característica del caolín es ser un retenedor de agua, cuando la superficie se va secando por la temperatura ambiente entra a ejercer la presión atmosférica contra el vapor que sale del fondo de la muestra, esta presión genera que la superficie del caolín comience a tener agrietamiento. ya que las partículas de caolín se tratan de unir lo más cerca posible a las partículas de agua que puede retener. Generando caminos en los cuales puede entrar el aire. El agua acumulada en los poros del caolín ejerce fuerzas para no perder su estado.

16.1.1.4 FASE 4:

La muestra de 100 por ciento caolines no presenta una caída abrupta de las tensiones. No genera paso completa del aire por la muestra en los primeros cinco días de ensayo. Lo que significa que el caolín puede retener grandes cantidades de agua, entre más inalterada la muestra es capaz de retener mayor porcentaje de agua.

16.2 CURVA DE RETENCION EN MUESTRA CAOILIN 100%

FIGURA 11 Curva de Retención en muestra 100% Caolín

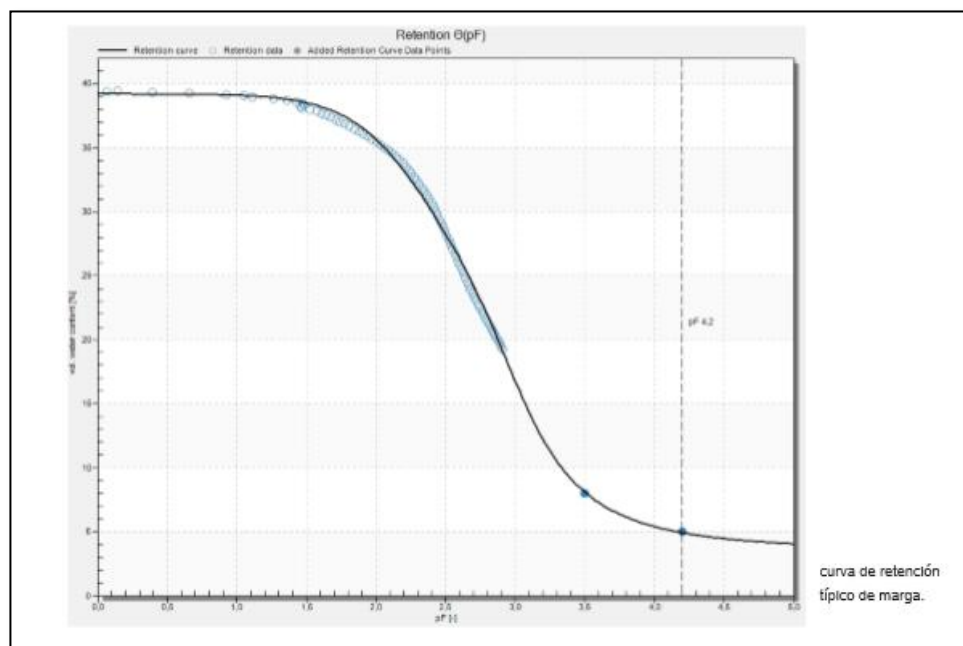


Fuente: Propia

La capacidad de retención del caolín está dada por la división de cantidad de masa que contenga un suelo con respecto al volumen. Esta medición es el resultado de la muestra tomada

16.2.1 GRAFICA DE RETENCIÓN DEL MARGA COMPUESTO DE CALCITA Y ARCILLA

FIGURA 12 Grafica de retención del marga



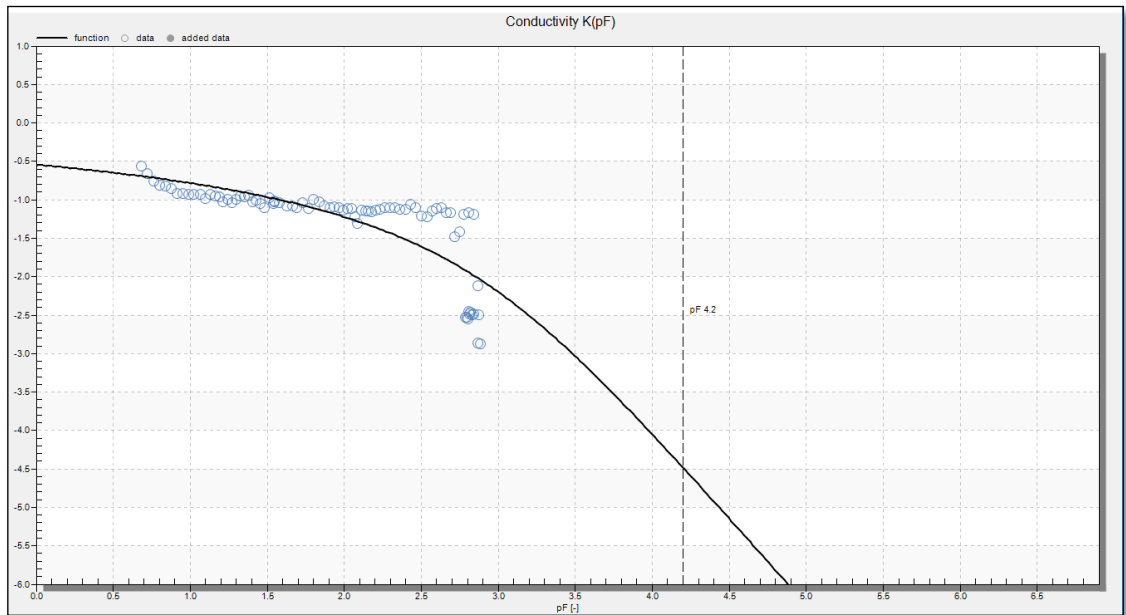
Fuente: Propia

El marga por contener gran cantidad de acilla se asemeja a las condiciones del caolín puro o con diatomeas, por tal razón se realizará la comparación con la retención generada.

- La cantidad volumétrica del agua en el marga esta entre el treinta y cinco por ciento en su mayor estado y disminuye con respecto al pF promedio a un cinco por ciento. A comparación con la muestra de caolín que llevo a contener un volumen al inicio del ensayo superior del treientos por ciento y llegando a la succión promedio de pF a dos ciento cincuenta porcientos.
- Los puntos de medición en el marga alcanzan a recorrer un ochenta por ciento de la curva, conectado con el pF en la última medición. El caolín contiene los puntos de análisis en el cuarenta por ciento de la curva y no finaliza el el pf.
- La forma de la curva en el marga se define como una curva típica donde se muestra un comienzo contante, luego un descenso continuo del contenido del agua y un aumento de la presión, pero siempre llegando a disminuir la mayor cantidad de volumen de agua posible, el caolín nos genera una curva menos pronunciada con un descenso mínimo y sin una disminución de agua considerable

16.3 CURVA DE CONDUCTIVIDAD EN MUESTRA CAOLIN 100%

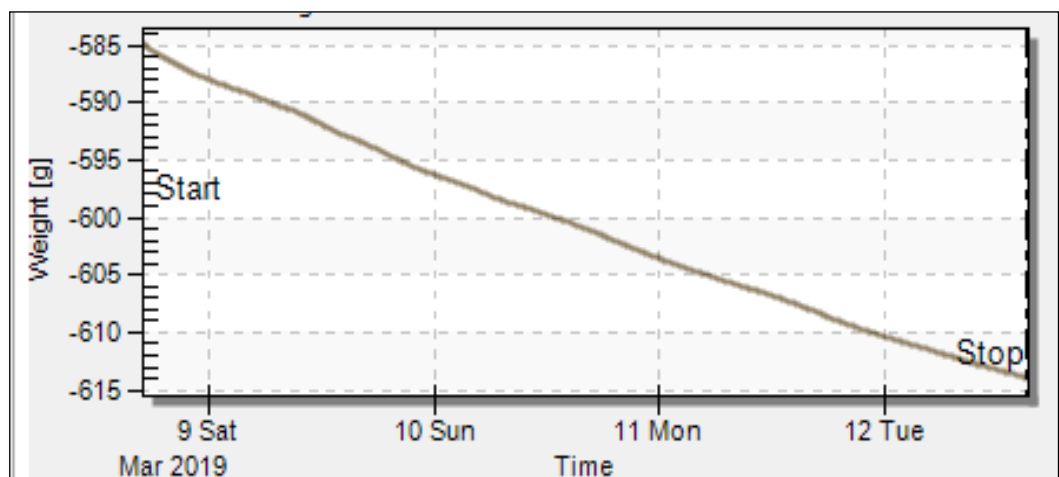
FIGURA 13 Curva de conductividad en muestra 100% caolin



Fuente: Propia

La retención en el caolín está dada por el cambio de masa en intervalos de tiempo. El software genera cien puntos de medición en la muestra, analizando el comportamiento de la conductividad del agua por el método de Darcy, al terminar la medición de los puntos comienza a generar una regresión no lineal para interpretar el comportamiento a futuro de la muestra. Creando curvas de contenido de agua volumétrico versus presiones negativas en pF.

FIGURA 14 curva de contenido de agua volumétrico versus presiones negativas



Fuente: Propia

La pérdida del agua en la muestra en una temperatura promedio de 16.45 grados es continúa, generando curvas típicas de conductividad en las muestras.

16.4 MUESTRA 90% CAOLIN Y 10% DIATOMEAS

El caolín al ser mezclado con otro compuesto varia su color y sus condiciones, las diatomeas son consideradas algas fosilizadas que existen en la mayoría de suelos lacustres en el mundo, durante la prehistoria los filophantos se expandieron por todo el planeta hasta llegar a los ríos de agua dulce.

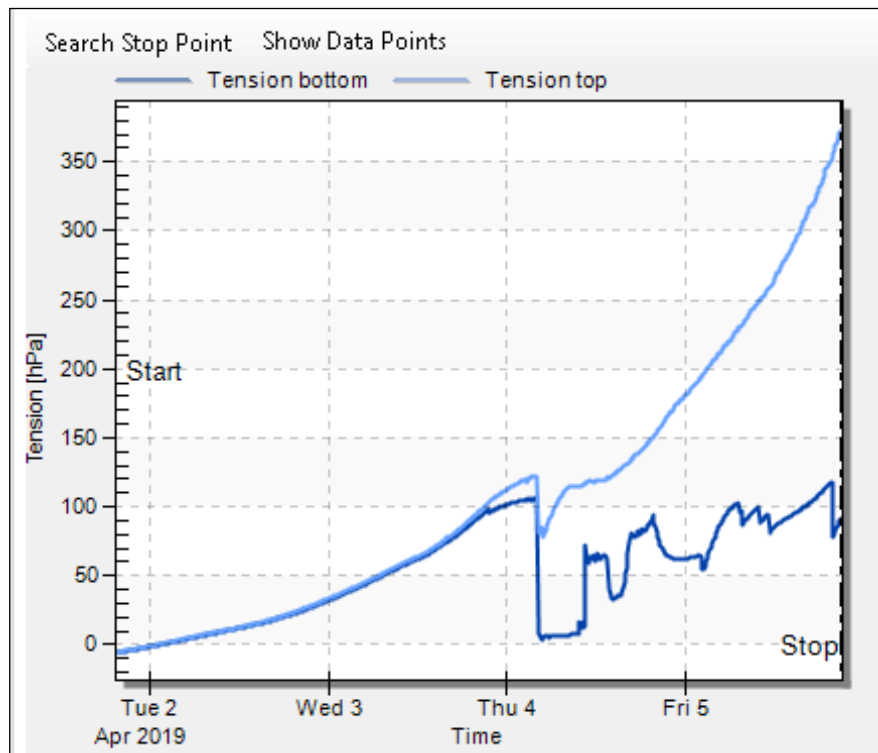
FIGURA 15 Muestra 90% caolín y 10% diatomeas



Fuente: Propia

Las diatomeas están en el grupo Ochrophyta, de color ocre dorado, su composición de sílice les permite generar dos capas o vulvas en las paredes con poros de pequeño tamaño y un cinturón el cual une las dos valvas y por donde entra su alimento y la energía del sol. Lo que permite repeler las partículas de agua de los suelos, dándole más firmeza y resistencia. Al mezclarlo con el caolín se evidencia evidencia un cambio en el color y la textura del material. El proceso de saturación es el mismo que el de cien porcientos caolín. El tiempo de saturación es acelerado, pero se deberá tres días más para conservar las condiciones del manual de mutras del fabricante, esta nueva textura permite hacer las perforaciones con más facilidad. Aun así, la muestra es muy líquida y no se puede generar un montaje más sencillo

FIGURA 16 Grafica de tiempo vs tensión de la Muestra 90% caolín y 10% diatomeas

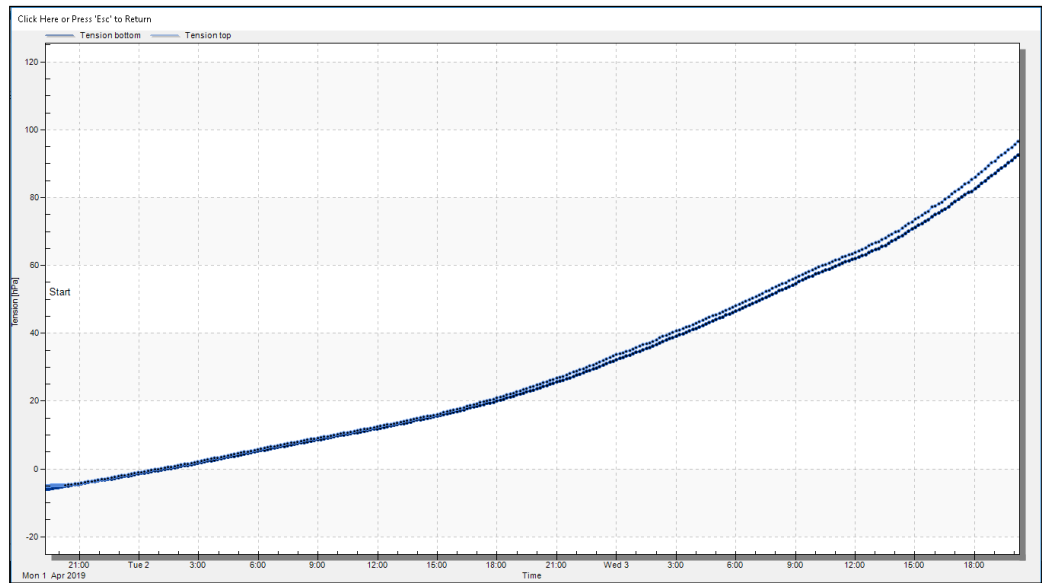


Fuente: Propia

Las mediciones en la primera fase de medición son similares, se evidencia un cambio significativo después del punto de ebullición de la muestra. Y el aumento de las tensiones según pasa el tiempo

16.4.1 FASE 1:

FIGURA 17 Fase 1 Muestra 90% caolín y 10% diatomeas

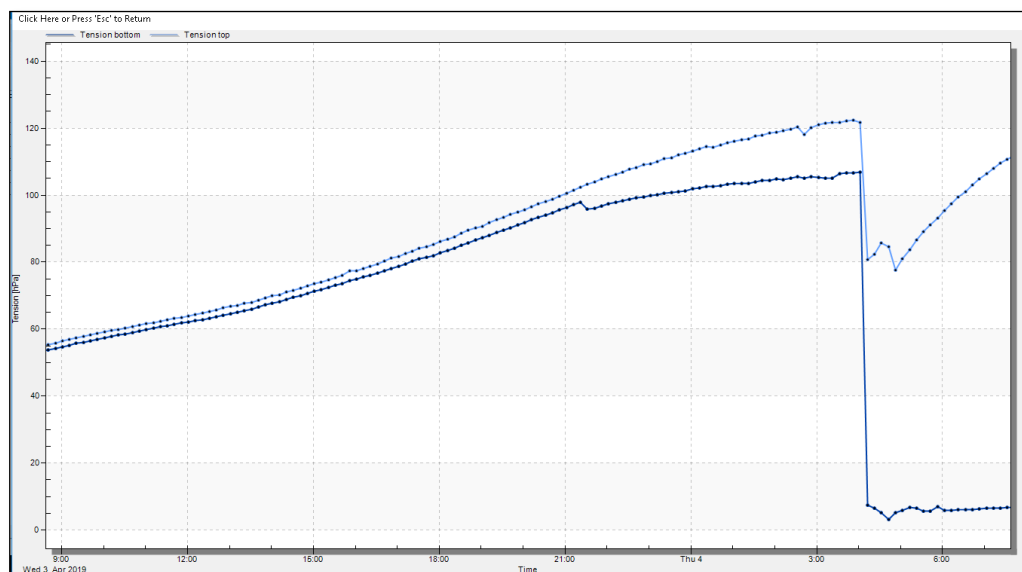


Fuente: Propia

Las lecturas de los tensiómetros tienen mediciones parecidas, sin embargo, el crecimiento de la gráfica, aunque sigue siendo exponencial es de menos envergadura. En las primeras horas del ensayo los tensiómetros tenían mediciones muy similares pero pasado los dos días comienza a evidenciarse diferencia de lecturas, las cuales aumentan pasado del tiempo

16.4.2 FASE 2:

FIGURA 18 Fase 2 Muestra 90% caolín y 10% diatomeas

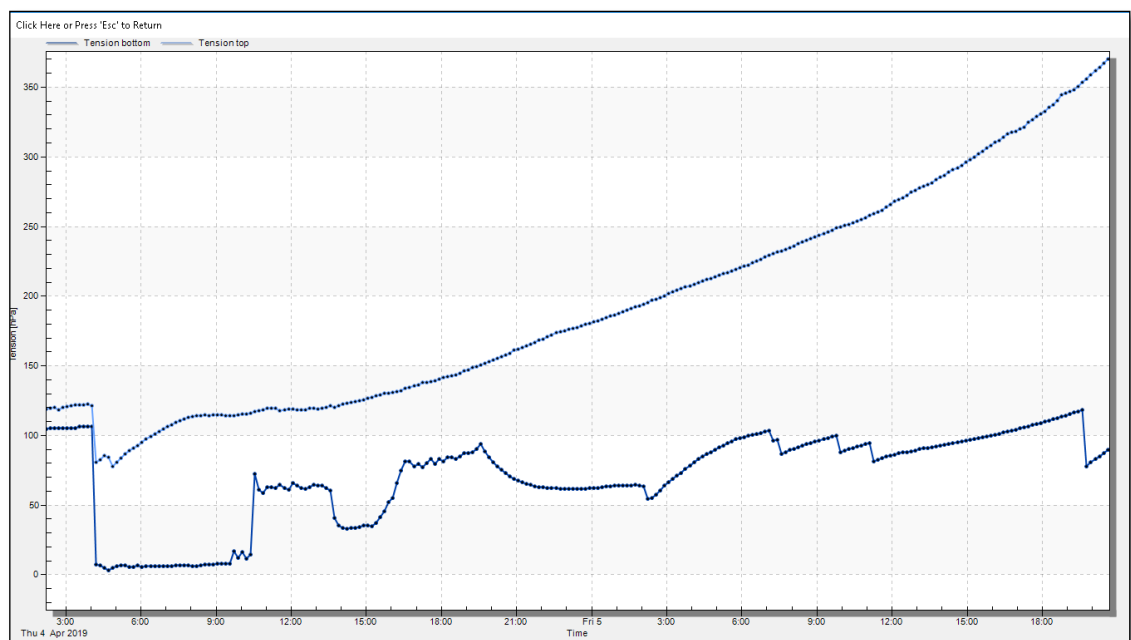


Fuente: Propia

Las mediciones de los dos tensiómetros siguen manteniendo un ritmo constante, en la entrada de aire del tensiómetro superior tubo un valor de presión pequeño con relación al tensiómetro inferior, el cual demuestra que la muestra contenía más aire en su centro. La caída del tensiómetro superior esta entre los ciento veinte a setenta y seis hPa, tensiómetro inferior mostro una caída significativa de ciento cinco a seis hPa.

16.4.3 FASES 3 Y 4

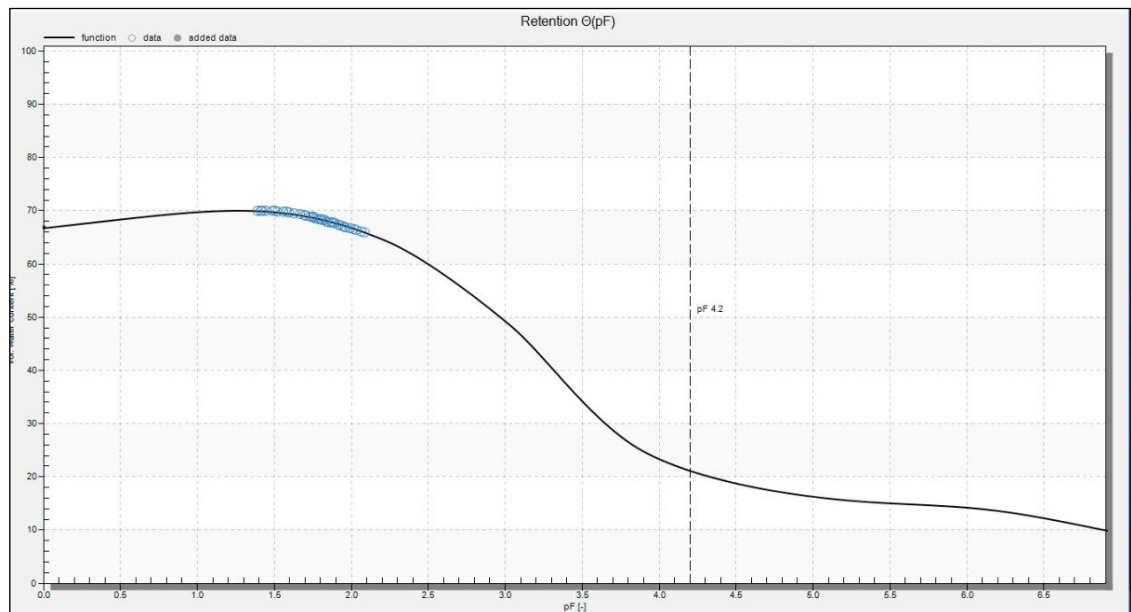
FIGURA 19 Fase 3 y 4 Muestra 90% caolín y 10% diatomeas



Fuente: Propia

El comportamiento del tensiómetro superior y el inferior son considerados atípicos, el eje de tensión superior después de la entrada del aire comienza a tener más tensión según pasa el tiempo, esta tensión sigue siendo exponencial. El tensiómetro inferior comienza a tener cambios bruscos con altos y bajos en la presión del suelo. Siguiendo la medición continuamente, durante los cinco días de la medición los sensores siguieron registrando valores en diferentes fases de la muestra sin poder llegar a la esperada.

FIGURA 20 Curva de retención para la Muestra 90% caolín y 10% diatomeas



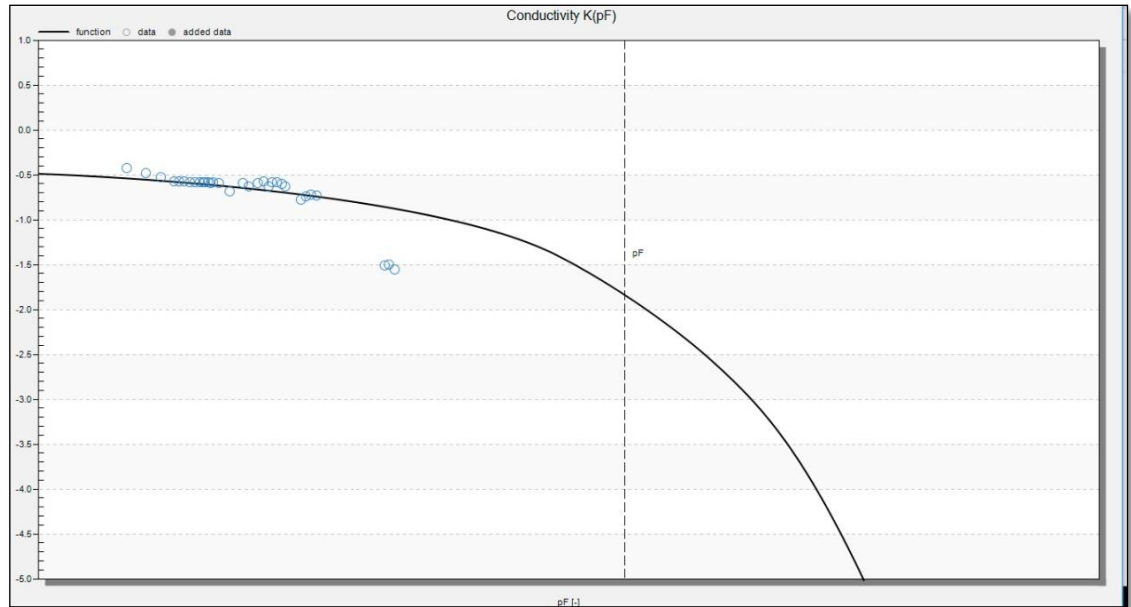
Fuente: Propia

El marga por contener gran cantidad de acilla se asemeja a las condiciones del caolín puro o con diatomeas, por tal razón se realizará la comparación con la retención generada.

- La cantidad volumétrica del agua en el marga esta entre el treinta y cinco por ciento en su mayor estado y disminuye con respecto al pF promedio a un cinco por ciento. A comparación con la muestra de caolín que llevo a contener un volumen al inicio del ensayo superior del treientos por ciento y llegando a la succión promedio de pF a dos ciento cincuenta porcientos.
- Los puntos de medición en el marga alcanzan a recorrer un ochenta por ciento de la curva, conectado con el pF en la última medición. El caolín contiene los puntos de análisis en el cuarenta por ciento de la curva y no finaliza el el pf.
- La forma de la curva en el marga se define como una curva típica donde se muestra un comienzo contante, luego un descenso continuo del contenido del agua y un aumento de la presión, pero siempre llegando a disminuir la mayor cantidad de volumen de agua posible, el caolín nos genera una curva menos pronunciada con un descenso mínimo y sin una disminución de agua considerable.

16.5 CURVA DE CONDUCTIVIDAD EN MUESTRA DE 100% CAOLÍN

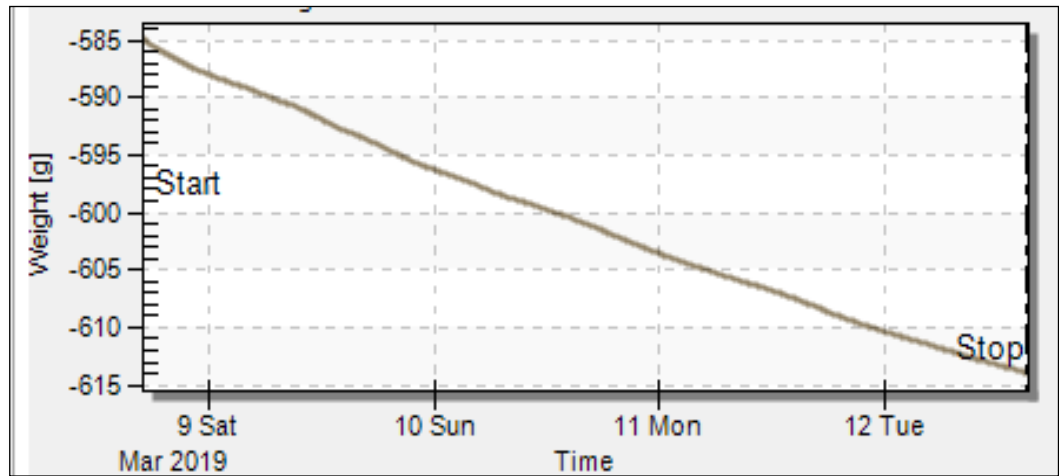
FIGURA 21 Curva de conductividad en muestra de 100% caolín



Fuente: Propia

La retención en el caolín está dada por el cambio de masa en intervalos de tiempo. El software genera cien puntos de medición en la muestra, analizando el comportamiento de la conductibilidad del agua por el método de Darcy, al terminar la medición de los puntos comienza a generar una regresión no lineal para interpretar el comportamiento a futuro de la muestra. Creando curvas de contenido de agua volumétrico versus presiones negativas en pF

FIGURA 22 Curva de contenido de agua volumétrico versus presiones negativas en pF



Fuente: Propia

La pérdida del agua en la muestra en una temperatura promedio de 16.45 grados es continúa, generando curvas típicas de conductibilidad en las muestras

16.6 MUESTRA 80% CAOLIN Y 20% DIATOMEAS

La cantidad de diatomeas cambia con mayor visibilidad el color blanco hueso del caolín, generando un material con mayor textura y diferente color.

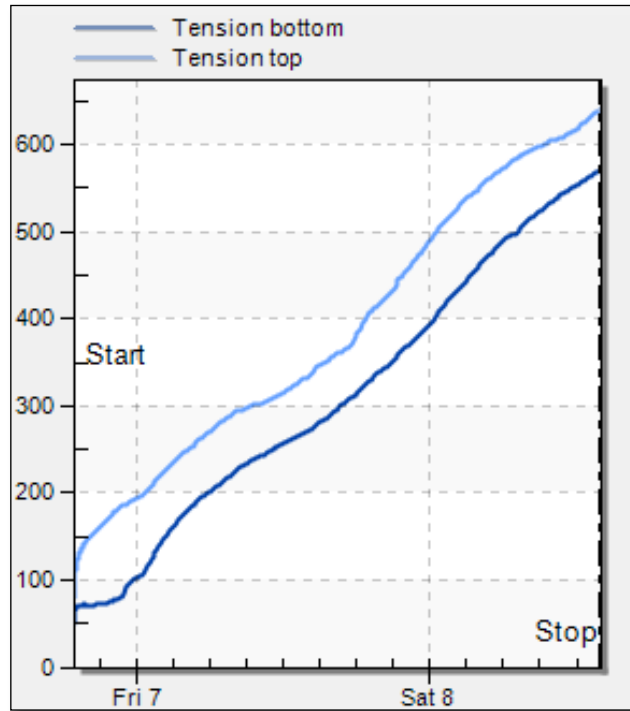
FIGURA 23 Muestra 80% caolín y 20% diatomeas



Fuente: Propia

La saturación de la muestra es acelerada como las anteriores, en menos de un día se puede evidenciar el brillo, visualmente la muestra es más compacta, se debe mantener el proceso de elaboración de la mezcla en el anillo de muestreo. En el montaje a la unidad de censado la mezcla es más sólida a comparación con la de cien por ciento de caolín.

FIGURA 24 Grafica de tiempo versus tensión Muestra 80% caolín y 20% diatomeas

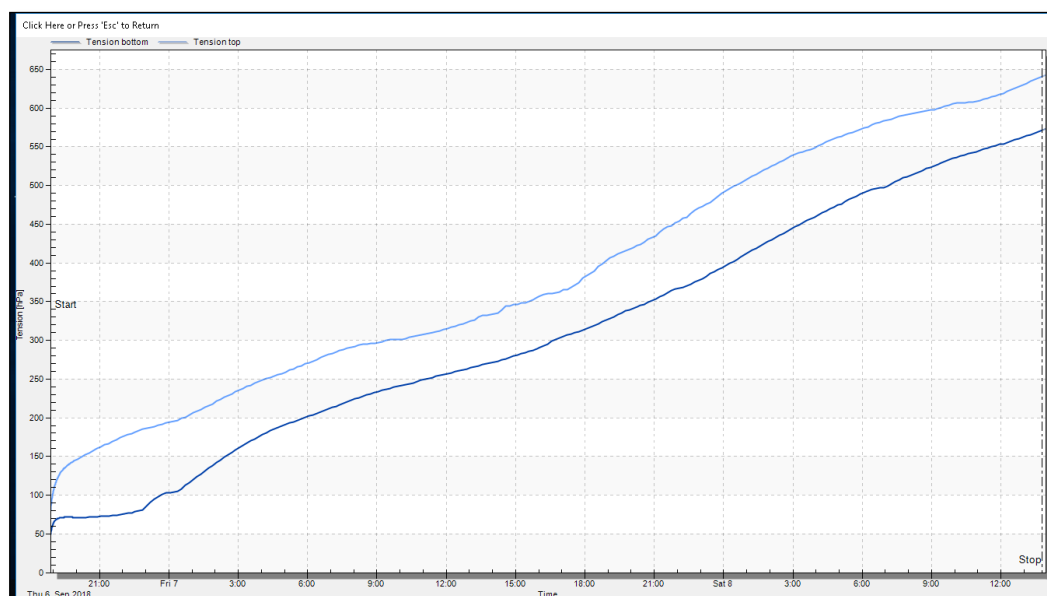


Fuente: Propia

La medición generada es atípica, se muestra un crecimiento de la succión permanente. Sin evidenciar entrada de aire en los tensiómetros ni cambios de presión en el interior de la muestra. Separaciones en las lecturas de medición de los ejes de tensión.

16.6.1 FASE 1:

FIGURA 25 Fase 1 Muestra 80% caolín y 20% diatomeas



Fuente: Propia

El análisis de los datos de esta muestra es muy corto. Su tiempo es aproximadamente cincuenta horas, en las cuales donde le tensiómetro superficial comenzó a tener una medición de ochenta porcientos de volumen de muestra esta medición incremento considerablemente respecto a las primeras horas del ensayo, luego su crecimiento es completamente creciente con pequeños altibajos. Hasta alcanzar tenciones de seis mil hPa. El tensiómetro inferior tiene una lectura similar, pero con presiones mas separadas. A comparación del tensiómetro superior llego alcanzar presión de inicio de sesenta hPa. Al a pasar las primeras horas se mantiene la misma presión separándose de las lecturas del primer tensiómetro. Pasado dos horas comienza un ascenso de las presiones hasta quinientos setenta hPa. Después de la detención del ensayo la muestra sigue teniendo una pequeña medición que sale por defecto.

16.6.2 FASE 2:

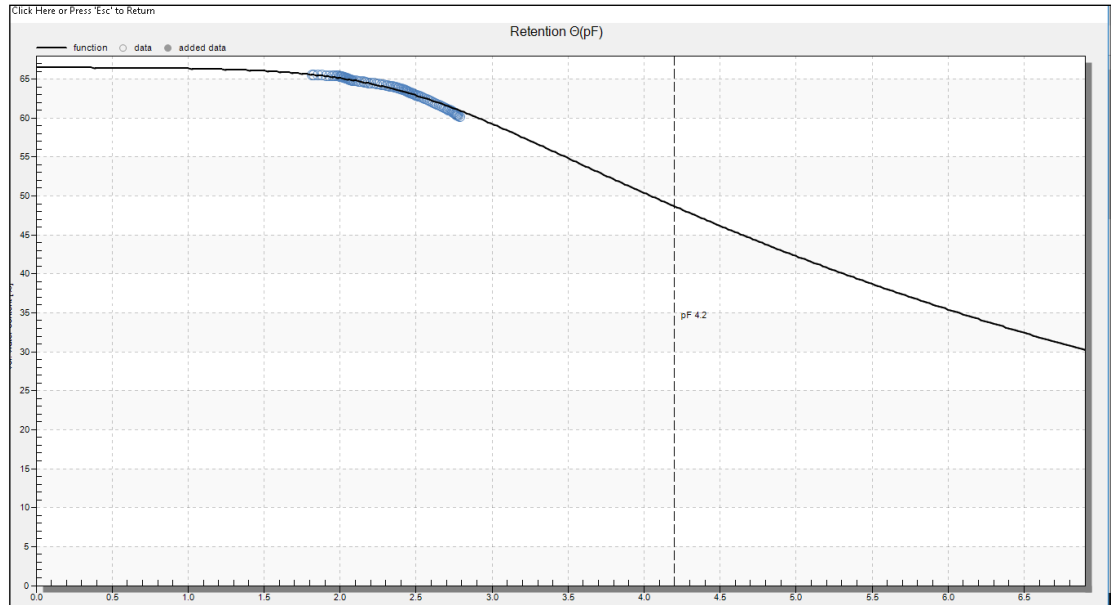
La medición no presenta entrada de aire en los tensiómetros, continúa sin tener cambios de presión en el centro de la muestra, el software genera una parada corta de los resultados.

16.6.3 FASE 3 Y 4:

No se genera caída de presión por cavitación de la muestra.

16.7 CURVA DE RETENCION MUESTRA 80% CAOLIN Y 20% DIATOMEAS

FIGURA 26 Curva de retención Muestra 80% caolín y 20% diatomeas

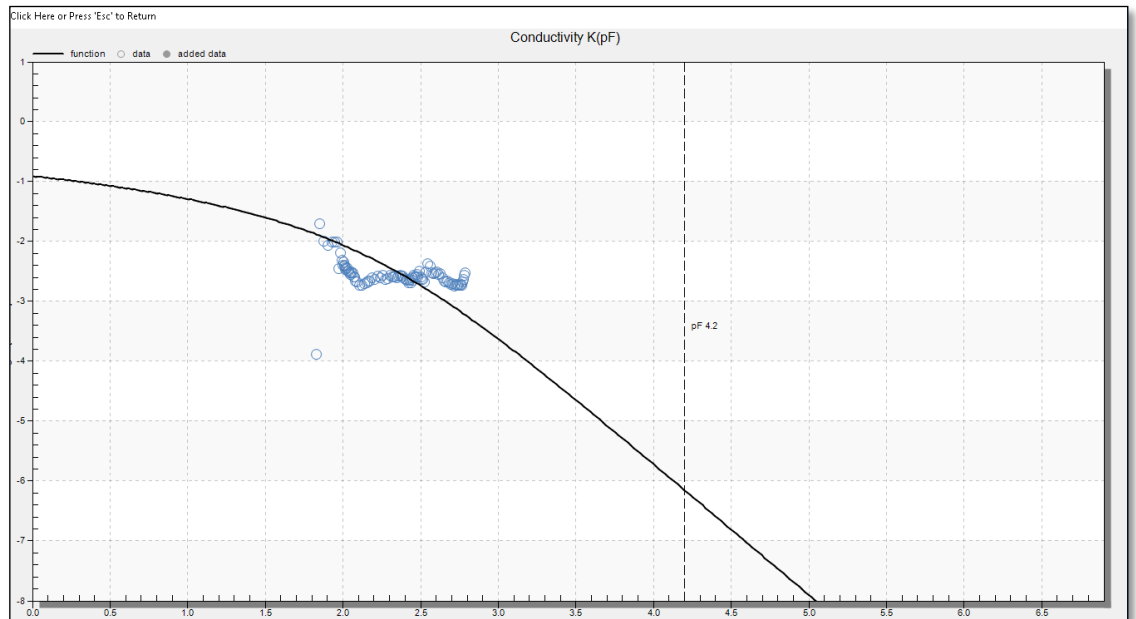


Fuente: Propia

- La distribución de puntos en las mediciones de la muestra es más concisa con la curva de retención, sin embargo, la retención tiene un contenido volumétrico mas alto las presiones son más elevadas,
- El rango de puntos generados en la lectura muestra un comportamiento más homogéneo en la estructura molecular de la mezcla de suelo
- La muestra no genero una entrada de aire en los tensiómetros lo cual no afecta en las curvas de retención del suelo

16.8 CURVA DE CONDUCTIVIDAD EN MUESTRA 80% CAOLIN Y 20% DIATOMEAS

FIGURA 27 Curva de conductividad Muestra 80% caolín y 20% diatomeas

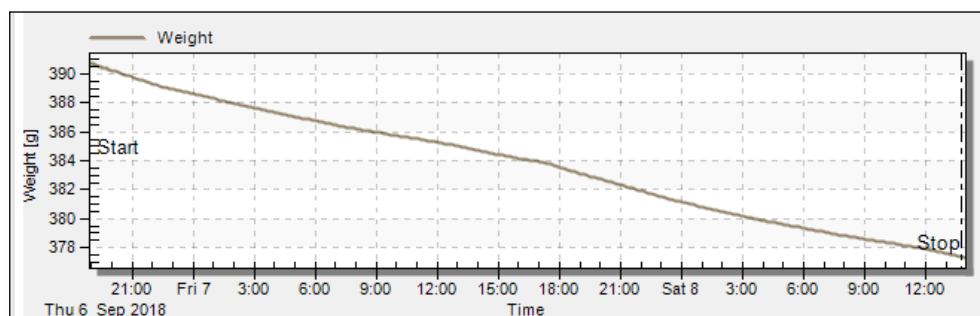


Fuente: Propia

La conductividad en la muestra tiene puntos más dispersos en sus lecturas, entre succiones de uno punto ocho y dos puntos cinco, un rango más corto a comparación de los demás. La grafica sigue teniendo una tendencia similar a sus antecesoras,

16.8.1 GRAFICA DE PERDIDA DE PESO

FIGURA 28 Grafica de tiempo versus peso Muestra 80% caolin y 20% diatomeas



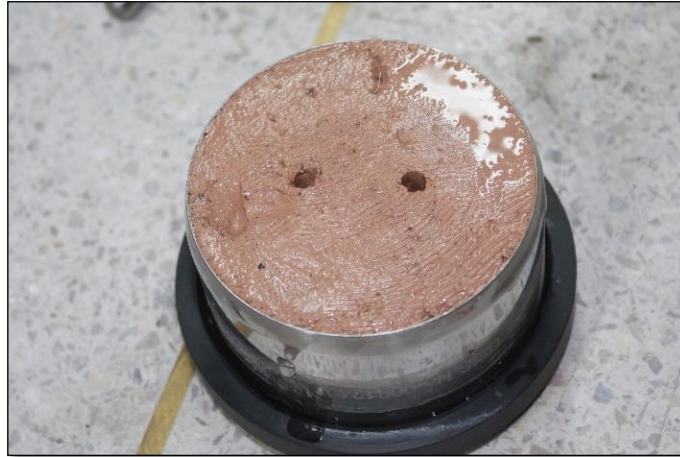
Fuente: Propia

La muestra tiene una pérdida de agua de veinticuatro gramos de agua en la medición, una perdida corta pero equivalente a la cantidad de tiempo que generó la medición.

16.9 MUESTRA 70% CAOLIN 30% DIATOMEAS

El porcentaje de diatomeas en esta prueba no altera las condiciones de color del caolín, la textura visualmente es parecida a las muestras del veinte y diez por ciento de diatomeas.

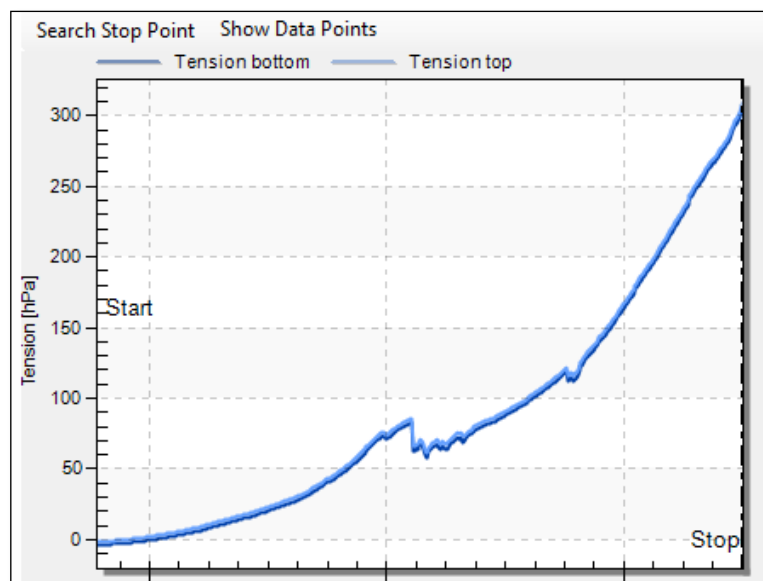
FIGURA 29 Muestra 70% caolín 30% diatomeas



Fuente: Propia

Las perforaciones y el montaje en la unidad de censado fueron de manera más prácticas, el material se tiene una mayor rigidez sin expulsar agua de la saturación, parte de la respiración de la muestra en la superficie se dio con gran facilidad, no mostro tanto agrietamiento como la muestra de cien porcientos caolín, el brillo de la muestra se perdió en un tiempo corto a comparación de las anteriores muestras.

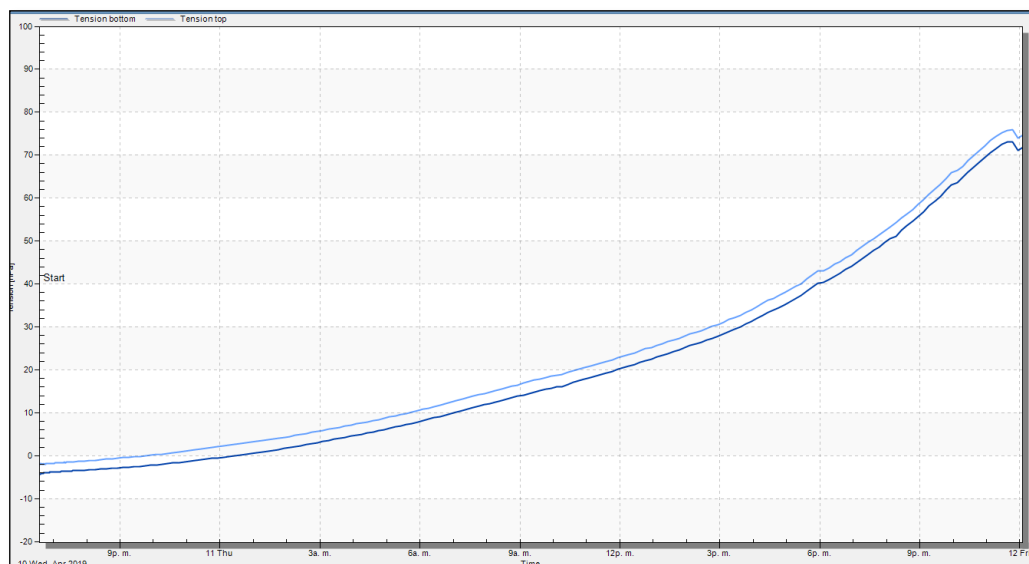
FIGURA 30 Grafica tiempo versus tensión Muestra 70% caolín 30% diatomeas



Fuente: Propia

16.9.1 FASE1:

FIGURA 31 Fase 1 Muestra 70% caolín 30% diatomeas

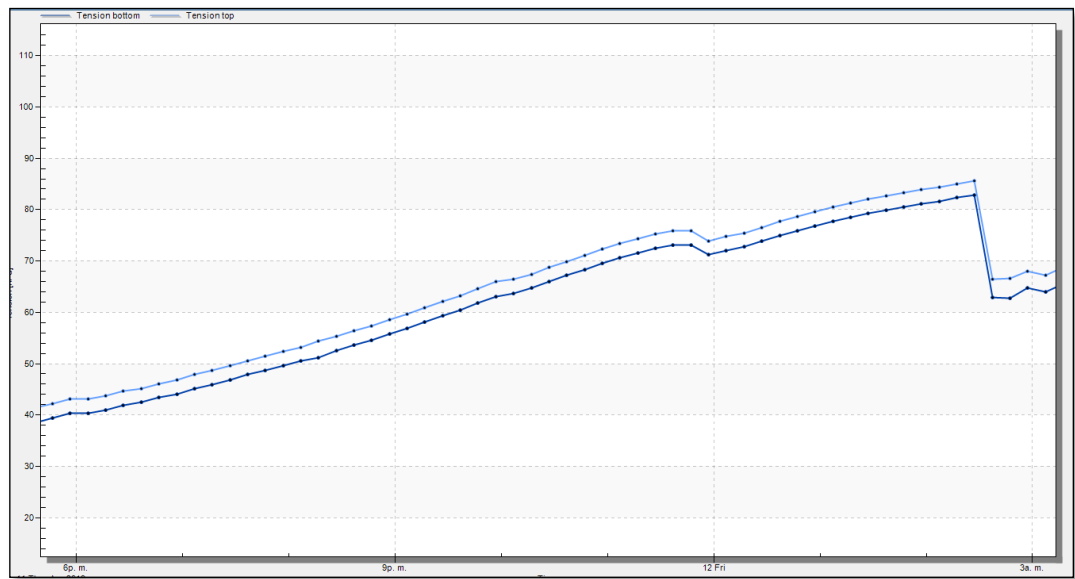


Fuente: Propia

Las primeras tenciones generadas son negativas, el rango de medida entre los dos tensiómetros es muy corto, indicando que la muestra comienza a tener un secado constante entre el lado superior e inferior. El crecimiento es completamente exponencial sin cambio alguno. A comparación de las muestras analizadas la tensión en la primera fase de estudio es menor, no supera los 100 hPa. La medición máxima llego a los 75 hPa antes de la cavitación

16.9.2 FASE 2:

FIGURA 32 Fase 2 Muestra 70% caolín 30% diatomeas

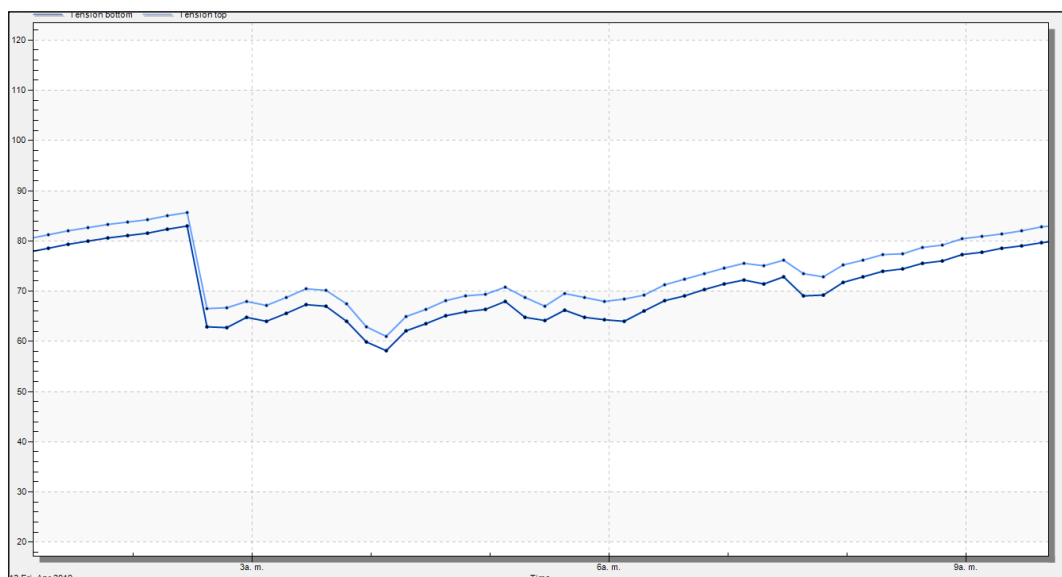


Fuente: Propia

La caída de la tensión en la muestra es corta, los ejes tomaron las mismas medidas durante la entrada del aire, la presión atmosférica es corta, punto máximo de tensión ochenta y cinco hPa aproximadamente con un bajón hasta sesenta y dos hPa, los primeros dos días de medición generaron las medidas

16.9.3 FASE 3:

FIGURA 33 Fase 3 Muestra 70% caolín 30% diatomeas

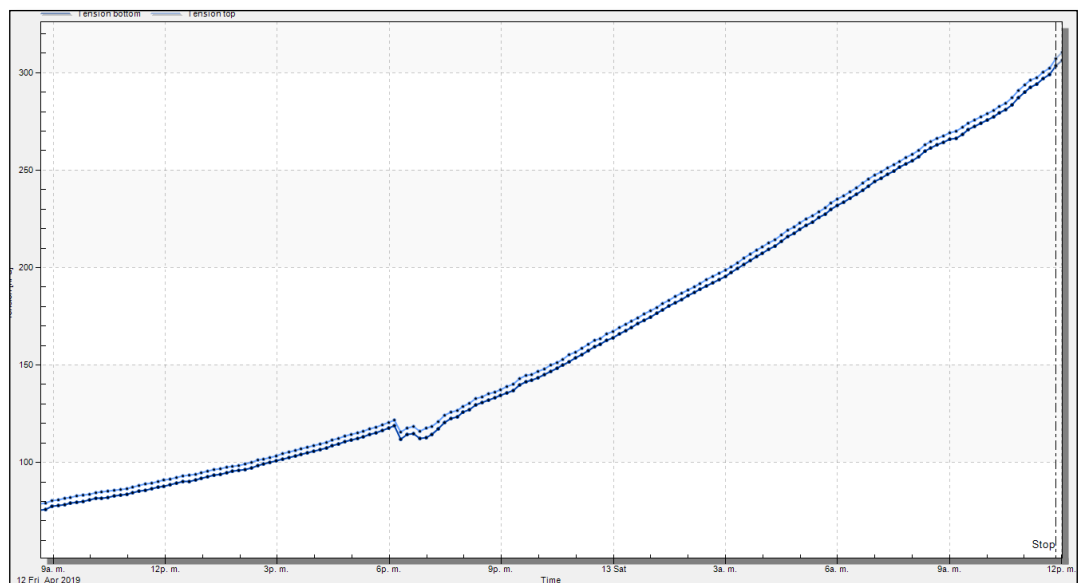


Fuente: Propia

Las primeras horas de la medición. Generaron comportamiento constante donde, la tensión tiene pequeños resaltos, Comparándola con la gráfica no se mantuvo la tendencia, por tal razón las presiones comenzaron nuevamente ascender de manera continua en la muestra, aunque hubo entra del aire. El vapor gel agua comenzó a generar nuevas lecturas en el ensayo

16.9.4 FASE 4:

FIGURA 34 Fase 4 Muestra 70% caolín 30% diatomeas

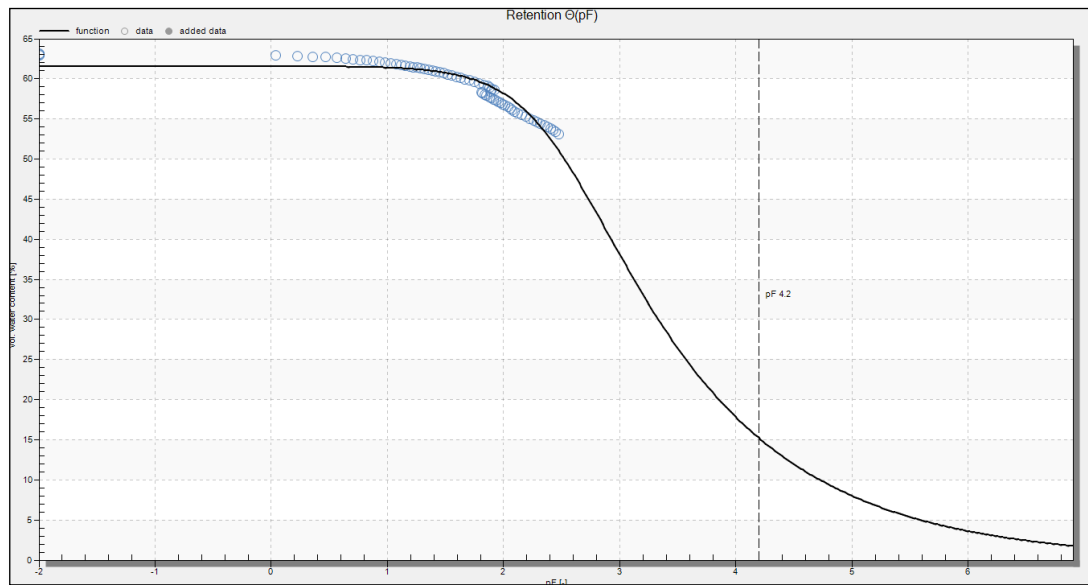


Fuente: Propia

La grafica no muestra un comportamiento similar a la curva predeterminada del sistema. Teniendo un crecimiento exponencial, no genera caída de las presiones. Si no un crecimiento continuo la lectura de cuatro días de la muestra no demuestra entrada de aire en el centro. Generando mayores lecturas.

16.10 CURVA DE RETENCION MUESTRA 70% CAOLIN Y 30% DIATOMEAS

FIGURA 35 Curva de retención Muestra 70% caolín 30% diatomeas



Fuente: Propia

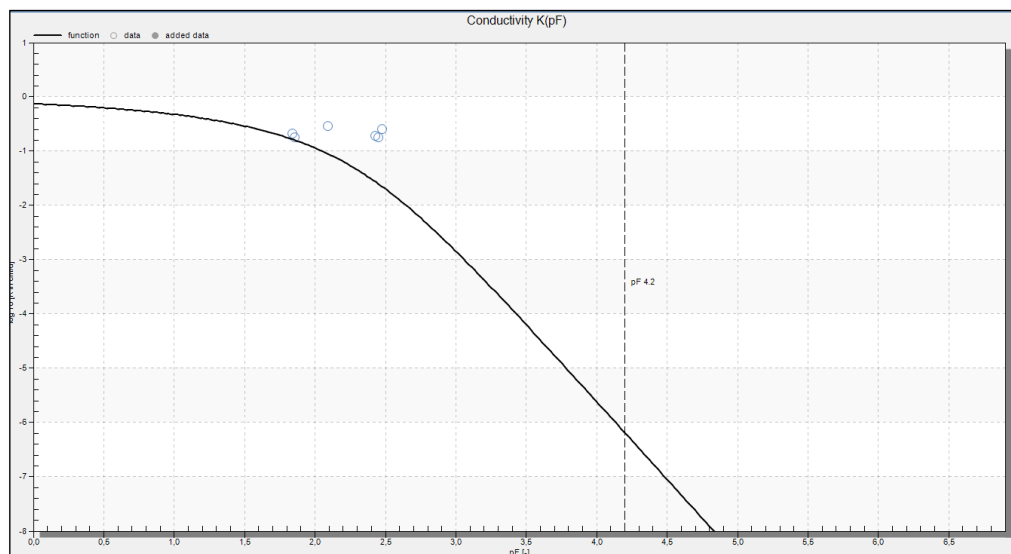
La curva de retención comienza generar cambios significativos demostrando mayor pérdida con respecto a la establecida por Meter, las pérdidas porcentuales del volumen de agua son mayores en las primeras horas de medición y pequeñas en la terminación del ensayo, los puntos de medición iniciales en el parámetro matricial son mas cercanos al resultado esperado. El porcentaje volumétrico de agua esta cercana a las sesenta y tres por ciento, llegando a su succión predeterminada entre cuatro punto tres.

16.11 CURVA DE CONDUCTIVIDAD EN MUESTRA 100% CAOLIN

Para Jiri Simunek entre más valiosa se vuelve la información. Uno puede esperar la sensibilidad de las lecturas del tensiómetro a aumentar con el tiempo. A medida que el suelo se vuelve más seco, la retención. La curva se vuelve más pronunciada, lo que produce mayores cambios en la presión⁵⁰

⁵⁰ (Parameter Estimation Analysis of the evaporation Method for Determining Soil Hydraulic Properties, 1998)

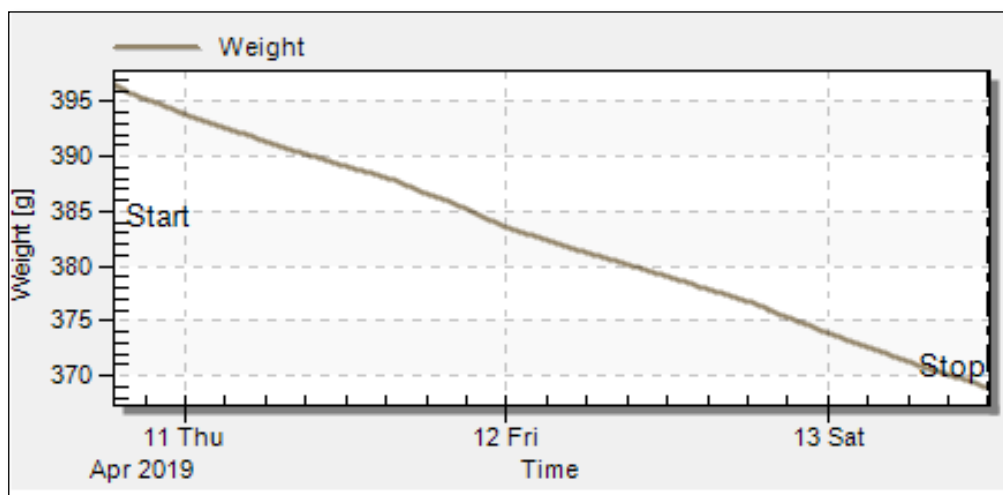
FIGURA 36 Curva de conductividad Muestra 70% caolín 30% diatomeas



Fuente: Propia

Los puntos generados en las primeras cien mediciones no muestran con claridad la dirección de la curva. Las tensiones son negativas y la succión aproximada a cuatro puntos seis.

FIGURA 37 Grafica tiempo versus peso Muestra 70% caolín 30% diatomeas



Fuente: Propia

La pérdida de peso en el ensayo reproducción por cuatro días es veinticinco gramos

17 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

17.1 MUESTRA 1

- Los tensiómetros muestran una lectura similar, teniendo un crecimiento lineal, con un crecimiento en general exponencial, aunque con una ligera caída en las lecturas el último día.
- La grafica muestra que el vapor generado naturalmente es constante en toda la muestra, aunque presenta una caída gradual el ultimo día
- Se comprueba que la conductibilidad es alta
- La pérdida de agua es proporcional a la pérdida de peso. Esta pérdida fue progresiva con respecto a los días de ensayo
- Se obtuvo la curva teniendo en cuenta que algunos puntos no son del todo consistentes ya que se dispersan
- Se puede observar que la succión inicial del ensayo diferencia entre presión de aire y agua es de 10 Kpa, de forma que la trayectoria es lineal desde la succión inicial.
- Se evidencia un cambio de saturación
- El porcentaje de humedad en C.C para un suelo franco-arcilloso es de 24% a una tensión de 0.3 atmosferas y un P.M.P a 15% de humedad con 26.851% de C.C y 15.514% para P.MP lo que confirma sin duda que efectivamente el suelo es arcilloso.
- Para obtener la curva de esfuerzo de humedad, se propuso una conductividad de 4.5 ds/cm para la profundidad de 0-30 y de 30-60

Muestra 2

- Como vemos el nivel de porosidad de la muestra es muy alta, esto permite que la infiltración del agua sea muy rápida y la retención de humedad muy baja.
- Los tensiómetros muestran una lectura similar hasta el tercer día, teniendo una caída en las lecturas entre los tensiómetros dando una medición incierta de 0.15 Hpa.
- Los resultados obtenidos no fueron satisfactorios, los datos registrados de la variación de las muestras indican la pérdida de 88,65 g en los cuatro días.
- Se evidencia un colapso en la presión del interior del tensiómetro razón por la que no logro alcanzar la cavitación en el tiempo estimado y como consecuencia no pudo generarse la curva de retención de manera adecuada.

Muestra 3

- Los tensiómetros denotan una lectura paralela, teniendo un crecimiento lineal en las fases de análisis, con una diferencia de 15 Hpa entre las dos curvaturas.
- Se evidencia que el vapor generado naturalmente es constante en toda la muestra y sale de la misma forma
- El aumento de la tensión es progresivo
- Se observan diferencias en los valores de contenido de humedad correspondientes a los potenciales superior al 11.32%
- Se muestra una variación de la permeabilidad saturada en función del índice de poros de la muestra y agrupadas en función de la procedencia de los limos
- Se evidencia una constante en la retención de la muestra y una evolución deficiente y dispersa de conductividad hasta alcanzar condiciones estacionarias de flujo bajo un gradiente constante
- Se obtuvo la curva teniendo en cuenta que algunos puntos no son del todo consistentes ya que se dispersan
- El porcentaje de humedad en C.C para un suelo franco-arcilloso es de 24% a una tensión de 0.3 atmosferas y un P.M.P a 15% de humedad con 57.4% de C.C y 7.9% para P.M.P lo que confirma sin duda que efectivamente el suelo no es arcilloso.
- Para obtener la curva de esfuerzo de humedad, se propuso una conductividad de 4.5 ds/cm para la profundidad de 0-30 y de 30-60.

Muestra 4

- Explicada como, las arcillas al perder agua con el paso del tiempo en este caso doce horas, tienden a tener solidificarse de pequeñas partes, reduciendo caminos de aire pequeños en la superficie, visualmente lo vemos como agrietamiento de la superficie, al tener ese camino pequeño.
- Las diatomeas al tener poros más pequeños que el caolín y estar distribuidos de una forma homogénea en la muestra, produce que la evaporación se más lenta, ya que repela el agua al caolín y hace una especie de barreras microscópicas las cuales mantiene el agua. Su retención comienza ser más alta.
- La conductibilidad del suelo con el aumento de diatomeas no tiene cambios significativos. Se ve una ligera nivelación en la succión con respecto al punto de equilibrio.

Los resultados generados en las muestras determinan las condiciones en las cuales realizo la medición, mostrando diferente comportamiento en cada una.

Tabla 6 Tabla de resultados

RESULTADOS						
ENSAYO	CONTENIDO DE AGUA %	PESO MUESTRA SECA	DENSIDAD	POROSIDAD	TIEMPO INICIAL	TIEMPO FINAL
100 % CAOLIN	303.	223.7	0.95	0.73	08/03/2019	12/03/2019
90% CAOLIN - 10 % DIATOMEAS	68.5	225.4	0.93	0.66	10/04/2019	13/04/2019
80 % CAOLIN - 20% DIATOMEAS	66.5	227.7	0.91	0.66	06/09/2108	09/09/2018
70%CAOLIN - 30% DIATOMEAS	64.1	236.9	0.95	0.64	10/03/2019	13/03/2019

Fuente: Propia

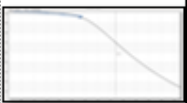

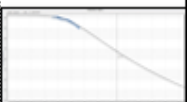
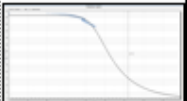
- Cada muestra ensayada requería de un montaje aproximado de dos semanas, en ese tiempo la saturación de la muestra y los tensiómetros se preparan. Generando lecturas de succión negativa en la muestra de suelos. Los ensayos de mezclas con caolín y diatomeas generaron un tiempo similar en su medición en la multi balanza del Hyprop Fit. El tiempo promedio en lectura de datos es de 3.5 días aproximadamente. No obstante, el tipo de material y sus componentes varían el tiempo en el equipo.
- El resultado de la muestra de cien porcientos caolín, demostró un contenido de agua mayor (303%). Este ensayo genero más tiempo de medición (4 días) y la perdida de volumen generada por la evaporación es la más alta.
- El menor contenido de agua en las muestras fue generado por 70% caolín y 30% diatomeas. Con un 64.1% contenido volumétrico de agua. con la misma densidad del caolín puro, en menor tiempo de lectura de datos.
- La porosidad del caolín puro resulto ser la más elevada (0.73), teniendo un descenso significativo con la mezcla de las diatomeas. Cuando se mezcla las diatomeas su porosidad suele ser similar, sin tener cambios entre mayor cantidad de diatomeas contenga la mezcla. El promedio de la porosidad en la mezcla con diatomeas es de 0.663
- Entre mayor contenido de diatomeas contenga la muestra. El peso seco es más alto (236.9), a comparación con el caolín puro (223.7)
- La densidad del agua no muestra cambios significativos. Se mantiene constante con los cambios porcentuales de la mezcla. Para Jiri Simunek entre más valiosa se vuelve la información. Uno puede esperar la

sensibilidad de las lecturas del tensiómetro a aumentar con el tiempo. A medida que el suelo se vuelve más seco, la retención. La curva se vuelve más pronunciada, lo que produce mayores cambios en la presión

17.2 ANALISIS DE CURVAS DE RETENCION EN MUESTRAS

La retención de un suelo depende de la textura, cantidad de material orgánico y tipo de suelo. La cual nos indica el comportamiento de las moléculas de gua con respecto a la succión del suelo. La fuerza con la cual la porosidad del material retiene cantidades de agua en su centro. Según el Dr thaweesak yingthawornsu, el estudio de las fuerzas de evaporación en una muestra de suelo determina las funciones hídricas entre el punto de saturación y marchites.⁵¹

Tabla 7 Tabla de resultados Retención

RETENCION					
ENSAYO	VOLUMEN EN % DE AGUA INICIAL	VOLUMEN EN % DE AGUA FINAL	p F INICIAL	p F FINAL	GRAFICA
100 % CAOLIN	300	147	0	7	
90% CAOLIN - 10 % DIATOMEAS	68.4	35	0	6.5	
80 % CAOLIN - 20% DIATOMEAS	66.2	30	0	6.65	
70%CAOLIN - 30% DIATOMEAS	62.3	0	-2	7	

⁵¹ YINGTHAWORNSUK, Dr.thaweesak, Internationalconference on computer science and information systems(ICCSIS15), UNIVERSITE DUQUEBECA MONTREAL, 2015

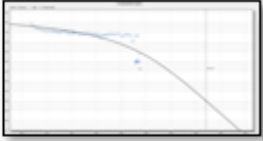
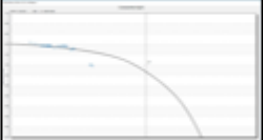
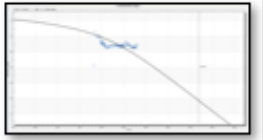
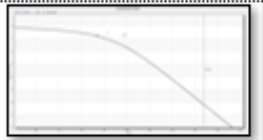
Fuente: Propia

- La muestra que contuvo más cantidad de agua por mayor tiempo es 100% caolín con un 300%, entre menos sea la concentración del caolín es Mas pequeña la cantidad de agua que retiene la muestra inicialmente
- La succión generada por el caolín y las diatomeas es la mismo, entre las muestras 100% caolín, 90% caolín 10% diatomeas y 80 % caolín 20% diatomeas. Comienza a generar un cambio des pues de la medición de 70 % caolín 20% diatomeas, las cuales empiezan en un valor negativo (-2), llegando a la succión final similar a las muestras anteriores.
- Las tres primeras muestras mostraron un comportamiento mas cercano a una arcilla, donde la gráfica es esbelta señalando que el contenido de material en la muestra tiene unos granos muy finos y una textura poca densa, la muestra de 70% caolín y 30 % diatomeas comienza a tener más un comportamiento de suelo franco.

17.3 ANALISIS DE CURVA DE CONDUCTIVIDAD EN MUESTRAS

La conductividad del suelo en los suelos compuestos con arcilla y diatomeas tiene un similar parecido, sin cambios significativos en la estructura de la curva

Tabla 8 Tabla resultados Conductividad

CONDUCTIVIDAD					
ENSAYO	Log 10 INICIAL	Log 10 FINAL	p F INICIAL	p F FINAL	GRAFICA
100 % CAOLIN	0.5	-6.00	0.00	4.9	
90% CAOLIN - 10 % DIATOMEAS	0	-8	0	5	
80 % CAOLIN - 20% DIATOMEAS	-1	-8	0	5	
70%CAOLIN - 30% DIATOMEAS	0	-8	0	4.7	

Fuente: Propia

- La conductividad del caolín puro nos mostro una gran cantidad de agua asimilada en la muestra, con un gran tiempo de espera para la entrada de aire hasta llegar a un estado sólido. La dispersión de los puntos de lectura es notoria después de la asimilación de esfuerzos del suelo
- En la muestra de 90% caolín 10% diatomeas, muestra una entrada de aire significativa después del pF estándar, una solidificación más rápida en la muestra, la dispersión en los primeros cien puntos de medidas es mas continua a la curva de conductividad
- Las tensiones mayores generadas esta en la muestra de 80 % caolín 30 % diatomeas, teniendo un rango mas grande en la cual la muestra comienza tener liberación de vapores de manera más rápida en todo el proceso de medición
- Los puntos de dispersión de datos en las primeras cien lecturas en la muestra 70% caolín 30% diatomeas

18 CONCLUSIONES

- Al hacer las curvas de retención y conductividad hidráulica en la muestra de 100% caolín se presentaron valores irregulares con respecto a los demás, por lo cual no se tomó como un dato confiable para la investigación.
- Se pudo determinar que el caolín (arcilla) es un material sumamente plástico, con partículas de tamaño extremadamente pequeñas y alta capacidad de expansión, mientras que las diatomeas, también son partículas de tamaño extremadamente pequeñas y gran resistencia a los esfuerzos.
- Se concluye que la curva de retención presenta cambios significativos ya que desde el porcentaje 90% caolín y 10% diatomeas, se evidencia que entre mayor es el porcentaje de diatomeas, menor es la succión, por ende disminuye la capacidad portante del suelo.
- Se concluye que la curva de conductividad no tiene cambios significativos, ya que el comportamiento de las gráficas desde el 100% caolín hasta el 70% caolín y 30% diatomeas, es muy similar.
- El tiempo de medición de cada muestra variaba dependiendo al porcentaje de caolín-diatomeas, la muestra que duró mayor tiempo en generar las curvas de retención y conductividad fue la 100% caolín.

19 RECOMENDACIONES

- Para la determinación y aplicación de las curvas de retención de los suelos, se deberá realizar un análisis físico completo del suelo.
- Utilizar tensiómetros para determinar la tensión del suelo y por ende el momento exacto que se deberá aplicar el riego.
- Volver a determinar las curvas de retención por lo menos de 3 a 4 meses, dependiendo de las labores de mecanización a la que esté sometida los suelos.
- Tomar las lecturas de tensiómetros por la mañana y tarde para la debida programación de riego con las curvas de retención.
- Hacer evaluaciones de los sistemas de riego antes del inicio del ciclo del cultivo, ya que el caudal medio que arrojará esta evaluación influirá en la programación de riego con las curvas de retención.

19.1 RECOMENDACIONES PARA LA TOMA DE MUESTRAS

Un buen muestreo asegurará obtener resultados confiables, por esto recomendamos tener en cuenta el siguiente protocolo de toma de muestras:

- Definir y delinear las unidades naturales o el uso de las mismas.
- Seleccionar el sitio de descripción y muestreo.
- Procesar planillas de control de muestreo, incluyendo registros de cada procedimiento (incluir fotografías).
- Ubicar el anillo asegurándose que el extremo afilado sea el primero en entrar en contacto con el suelo.
- Retirar el anillo cuidadosamente dejando que sobresalga un poco de suelo en los extremos del mismo.
- Tapar y rotular la muestra.

18 BIBLIOGRAFIA

BARRERA Ortiz, MUÑOZ José *et. al.* Análisis de la influencia de la distribución de tamaño de partículas en la conductividad hidráulica en arenas limpias.

BARBECHO Juan y CALLE Johana, Caracterización de la conductividad hidráulica de los suelos, 2012.

BEJARANO Jean, CORRALES Valeria, Daniela Realpe. Determinación de curvas de retención de agua para suelos no saturados y su relación con la estabilidad de taludes, 2015.

CAÑERO, ingrid, Comportamiento de suelos no saturados. Estado del conocimiento p.17-18.

CHIAPONNI L. Water retention curves of multicomponent mixtures of spherical particles, Italy, 2017.

DONADO GARZON, Leonardo David, COLMENARES MONTAÑEZ, Julio Esteban, Modelo de Conductividad Hidráulica en suelos, Tesis de Magister en Ingeniera, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá DC. May0 2014.

DURNER w. Shyfit user's manual draft versión 0.24, November 10,1998.

GIL LOPEZ, Blanca Emilse, Fitólitos en cálculo dental de poblaciones Tempranas del valle geográfico del río Cauca (500 a.C. – 500 d.C.). Aproximación a la paelodieta, Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Maestría en Antropología, Bogotá, Colombia 2011

GONZÁLEZ J.L, MÉRIDA J, CORRAL L. y PANEQUE G, Caracterización de rocas calcáreas sobre las que se desarrollan suelos forestales de la reserva de grazalema (cádiz), Estudios geol., 43: 387-392 (1987).

GABRIELS Donald, LOBO Deyanira L. y PULIDO Mansonia M, Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos, Gabriels et al. Venesuelos 14:7-22

G. LÓPEZ-Canteñs , J. HERRERA-Puebla, A. OSTOS-SANTOS, L. LIZARRAGA-MENDIOLA y J. HERNÁNDEZ-Avila, Aplicación de modelos matemáticos para la obtención de la curva de retención de humedad del suelo, Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5. Carretera México-Texcoco. C.P. 56230. Chapingo, México.

JIRI Simunek, OLE Wendroth, Van GENUCHTER, Parameter Estimation Analysis of the evaporation Method for Determining Soil Hydraulic Properties, SOIL SCI, 1998.

JUAREZ BADILLO, Eulalio RICO RODRIGUEZ, Alfonso, Libro Mecanica de suelos – Tomo III, Limusa, 2010

HANSEN, Gretel, determinación de humedad gravimétrica de suelos. su correlación con sensores de humedad, Centro de Estudios Hidro-Ambientales, 2010.

KANG M, CHENG C.L, BILHEUX H.Z, LEE J., HORITA J., WARREN J.M, Multiple pixel-scale soil wáter retention curves quantified by neutrón rafiography, United States, 2014.

M. Fontanet, G. et al. Caracterización hidráulica se suelos en ensayos de eco fisiología con el sistema HYPROP y WP4C.

MARTINEZ FERNANDEZ, J. Medida de Curvas de retención de humedad en laboratorio y su estimación. Departamento de geografía. Universidad de Salamanca.

METER GROUP, EUROABC Blog de lisímetro, curva de retención de humedad de una arcilla, 2014.

MEZA OCHOA, Victoria Elena. Suelos Parcialmente Saturados, de la investigación a la Cátedra Universitaria. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia, 2012.

MORALES, Maia Maitena Tensión superficial: fenómeno sencillo, fenómeno más que observado, pero tantas veces desconocido por su nombre, s.f.

ORDUZ, Nidia, MULOZ, Jose, COLMENARS, Julio, DONADO, Leonardo. Análisis de la influencia de la distribución de tamaño de partículas en la conductividad hidráulica en arenas limpias, XI Jornadas Geotécnicas de la ingeniería en Colombia.

PEREZ GARCIA Natalia, GARNICA ANGUAS Paul, POLA VELAZQUEZ Julio Cosme. Predicción de la curva característica con el modelo de proporcionalidad natural. Instituto Mexicano de Transporte. México, 2008.

PEREZ GARCIA Natalia, Determinación de curvas, características en suelos no saturados con celdas de presión, SANFANDILA, 2008.

Programa Sub Sectorial de Irrigaciones. Ministerio de Agricultura, Mexico, DF, 2009.

SANCHEZ DIAZ, Laura Karina. Análisis del comportamiento de la curva característica de humedad en geo-materiales intermedios sometidos a diferentes niveles de estrés térmico. Bogotá. 2015.

SCHINDLER uwe, VON UNOLD George, MULLER Lothar, Messung bodenhydraulischer kennfunktionen von Boden im ladee im Zyklus austrocknung und Wiederbefeuchtung.

SCHMUGGE, T. J., 1985: Remote sensing of soil moisture. In: Hydrological Forecasting (M. G. Anderson y T. P. Burt, eds.), John Wiley, Nueva York, págs. 101 - 124. 5. Klute, A. (ed.), 1986: Methods of Soil Analysis. Part I: Physical and mineralogical methods. Second edition, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.

TORRES-PAPAQUI, Juan Pablo Tensión superficial, Departamento de astronomía Universidad de Guanajuato.

Universidad Industrial de Santander, Boletín de Geología No. 2, Facultad de petróleos, Departamento de Geología.

YANG Wen-Hsi. Mapping soil water retention curves via spatial Bayesian hierarchical models, Australia, 2006.

YINGTHAWORNISUK, Dr.thaweesak, International conference on computer science and information systems (ICCSIS15), UNIVERSITE DUQUEBECA MONTREAL, 2015

ZOTARELLI Lincoln, DUKES Michael y MORGAN Kelly, Interpretación del contenido de humedad del suelo para determinar capacidad de campo y evitar riego excesivo en suelos arenosos, utilizando sensores de humedad, Servicio de Extensión Cooperativa de la Florida, Instituto de Alimentos y Ciencias Agrícolas, Universidad de la Florida. (UF/IFAS). Fecha de primera publicación: January 2013. Revisado February 2019.

20 ANEXOS

A. GUIA DE LABORATORIO

B. MANUAL DE USUARIO